

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra měřicí a řídicí techniky**

**Monitorování provozu a řízení automatických  
přepravních systémů**

**Monitoring and control of automatic  
transport systems**

# Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Břemek**  
Studijní program: N2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 2601T004 Měřicí a řídicí technika  
Téma: **Monitorování provozu a řízení automatických přepravních systémů.**

**Monitoring and control of automatic transport systems.**

Zásady pro vypracování:

1. Analýza prostředků používaných u automatických přepravních systémů.
2. Návrh koncepce laboratorního automatického přepravního systému.
3. Realizace laboratorního automatického přepravního systému.
4. Testování funkčnosti a vlastností systému.
5. Zhodnocení výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Koziorek, J.; Chromčák, L. Logické systémy řízení. Učební text, příklady pro cvičení. VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1490-2.
2. Polka, D. Motors & Drives. ISA 2003, USA, ISBN 1-55617-800-X.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2008

Datum odevzdání: 07.05.2009

---

doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.  
*vedoucí katedry*

---

prof. Ing. Ivo Vondrák, CSc.  
*děkan fakulty*

## **Prohlášení**

*Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně.  
Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.*

.....  
*Jan Břemek*

*Datum odevzdání diplomové práce : 7.5.2009*

## **Poděkování**

Chtěl bych touto cestou velmi poděkovat vedoucímu mé diplomové práce, panu doc. Ing. Jiřímu Koziorkovi, Ph.D. za cenné rady, pravidelné konzultace a připomínky spojené s vypracováním mého úkolu. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Davidu Valovi za množství praktických rad. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat svým rodičům a příbuzným za podporu a trpělivost během tvorby této diplomové práce.

## **Abstrakt**

Tato práce je zaměřena na praktickou realizaci autonomně naváděného systému, určeného pro automatickou přepravu nákladu. Jedná se o robot tvořený hliníkovou konstrukcí, opláštěný plastovými kryty, poháněný dvěmi samostatnými elektromotorovými jednotkami. Součástí robotu je soustava snímačů, zajišťující bezpečný provoz, sledování požadované trajektorie a identifikaci přepravovaného nákladu. Řídící jednotkou je programovatelný logický automat řady X20, rakouské společnosti Bernecker + Rainer. Celá soustava je napájena z jediné olovené baterie, převod hodnot napájecích napětí pro PLC a ostatní periferie zajišťují dva napěťové měniče. Komunikace s nadřazeným systémem je realizována prostřednictvím bezdrátové sítě WIFI. Identifikaci nákladu obstarávají tenzometrická váha a jedno ze dvou čtecích zařízení RFID karet, umístěné v zadní části robotu. Detekce projížděné dráhy je zajištěna sadou infračervených odrazných senzorů a druhým RFID čtecím zařízením.

## **Klíčová slova**

Robot, baterie, měnič DC-DC, programovatelný logický automat, task, motor, WIFI, Ethernet, RS-232, RFID, sonar, detektor čáry, infračervený dálkoměr, servomotor, váha, programovací jazyk C, ASCII

## **Abstract**

This work ranges to practical realization of independently guided system, intended for automatic load transfer. This means a robot with aluminous construction, jacketed in plastic cover, driven by couple of electromotive units. Basic part of the robot consists of sensors system to assure safety operation, to follow the trajectory and to identify a transported load. Controls unit is a programmable logical controller, X20 series, made by Bernecker + Rainer corporation. The whole system is powered by just one lead battery and voltage conversions for feeding PLC and other peripheries caters two voltage converters. The communication with the superior system is made by wireless network. The truck identification is ensured by tensometric gravity module and by one of the couple radio control identity card readers, placed in rear robot's part. Path detection is ensured by set of infrared reflective sensors and by the second radio frequency identity card reader.

## **Key words**

Robot, battery, DC-DC converter, programmable logical controller, task, motor, WIFI, Ethernet, RS-232, RFID, sonar, line detector, infrared distance meter, servomotor, gravity, programmable language C, ASCII

## Seznam použitých symbolů a zkratek

AGV	- Automatic guided vehicle (automaticky řízené přepravní zařízení)
AP	- Access Point (přístupový bod)
ASCII	- American Standard Code for Information Interchange (americký standardní kód pro výměnu informací)
A/D	- analogově digitální
b/s	- bits per second (bity za sekundu)
CLK	- Clock
CMOS	- Complementary Metal Oxide Semiconductor (polovodič s doplňkovým oxidem kovu)
D/A	- digitálně analogový
GND	- zemní vodič
Ethernet	- místní datová síť
HS	- High speed
I/O	- Input/Output (vstup/výstup)
IP	- Internet Protocol (adresa zařízení v počítačové síti)
IR	- infrared (infračervený)
kb/s	- kilobits per second (kilobity za sekundu)
kHz	- kilohertz
LASER	- Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (fotony směřované do úzkém svazku)
LED	- Light Emitting Diode
LGV	- Laser guided vehicle (laserově naváděné vozidlo)
MHz	- Megahertz
OZ	- Operační zesilovač
PC	- osobní počítač
PLC	- Programmable Logical Controller (Programovatelný logický automat)
R/W	- read/write (čtení)
RxD	- Received data (přijímaná data)
RS-232	- Recommended Standard 232, sériové rozhraní
ss.	- stejnosměrný
st.	- střídavý
TTL	- Transistor-transistor logic
TxD	- Transmitted data (vysílaná data)
USB	- Universal Serial Bus
Wi-Fi	- wireless fidelity (bezdrátová věrnost) – označení komunikační bezdrátové sítě

## Seznam použitých cizích slov

Analog	- analogový
Baudrate	- přenosová rychlost
Buffer	- vyrovnávací paměť
Digital	- digitální
DC-DC converter	- direct current - direct current converter (měnič úrovní stejnosměrného napětí)
Embedded	- vestavěný, vestavný
High	- zde ve významu log.1
Interface	- rozhraní
Low	- zde ve významu log.0
Multitasking	- zpracování více úloh najednou
Odometrie	- metoda založená na měření ujeté vzdálenosti
Task	- úloha



# Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>ANALÝZA PROSTŘEDKŮ POUŽÍVANÝCH U AUTOMATICKÝCH PŘEPRAVNÍCH SYSTÉMŮ</b>	<b>2</b>
2.1	METODY ŘÍZENÍ PŘEPRAVNÍCH SYSTÉMŮ	2
2.1.1	Indukční řízení	2
2.1.2	Optické řízení	4
2.1.3	Metoda sledování referenčních bodů	5
2.1.4	Laserové řízení	6
2.1.5	Prostorové řízení	7
2.2	KOMUNIKACE S PŘEPRAVNÍM SYSTÉMEM	8
2.2.1	Indukční komunikace	8
2.2.2	Radiová a infračervená komunikace	9
<b>3</b>	<b>NÁVRH AUTOMATICKÉHO PŘEPRAVNÍHO SYSTÉMU</b>	<b>10</b>
3.1	PROGRAMOVATELNÝ AUTOMAT	10
3.1.1	Přídavné moduly	12
3.2	NAPÁJECÍ SOUSTAVA	16
3.2.1	Výkonová část	16
3.2.2	Napěťové měniče	18
3.3	SNÍMAČE FYZIKÁLNÍCH VELIČIN	20
3.3.1	Inkrementální snímač	21
3.3.2	Ultrazvukový dálkoměr SRF05	23
3.3.3	Optický dálkoměr GP2Y0A700	25
3.3.4	Detektor čáry	27
3.3.5	Tenzometrická váha	29
3.4	PERIFERIE	31
3.4.1	Servomotor	31
3.4.2	Čtečky RFID kódů	33
<b>4</b>	<b>ŘÍZENÍ ROBOTU</b>	<b>35</b>
4.1	GEOMETRIE PODVOZKU	35
4.2	VYHODNOCENÍ SLEDOVANÉ TRAJEKTORIE	36
4.3	KOREKCE DRÁHY	38
4.3.1	Řízení robotu přírůstky vzdáleností	38
4.3.2	Řízení robotu regulací rychlostí otáčení kol	41
4.4	DETEKCE PŘEKÁŽEK	44
4.5	ŘÍDÍCÍ PROGRAM	45
4.5.1	Úloha „Serial“	46
4.5.2	Úloha „CardReader“	47
4.5.3	Úloha „Sensors“	47
4.5.4	Úloha „Engines“	49
<b>5</b>	<b>VLASTNOSTI PŘEPRAVNÍHO SYSTÉMU</b>	<b>51</b>
5.1	LOKALIZACE PŘEKÁŽEK	51
5.2	BEZDRÁTOVÁ KOMUNIKACE	52
5.3	IDENTIFIKACE NÁKLADU	53

5.4	PŘEPRAVA NÁKLADU .....	53
5.5	VIZUALIZACE PROCESU .....	54
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>56</b>
<b>7</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>59</b>

# 1 Úvod

Automatické přepravní systémy se v nejrůznějších typech provozů uplatňují již několik desetiletí. Možností jejich aplikace neubývá, naopak podmínky pro jejich nasazení jsou vzhledem k rozšiřování používaných technologií příznivější. S ohledem na růst ceny lidské práce a pokles cen moderních technologií se zavádění automatických přepravních systémů stává výhodnou investicí. Rozmanitost aplikací se od zautomatizování ručních paletových vozíků a tahačů velice rozšířila. Těžko bychom hledali provozy, kde nelze únavnou, jednotvárnou práci ve zdraví neprospívajícím prostředí nahradit na míru šitou variací umělých dělníků bez sociálního citění.

Již na začátku je potřeba říci, že volba technologie a nalezení optimálního způsobu řízení toku materiálu záleží především na potřebách podniku. Optimalizace návrhu řízení postupuje od nejjednoduššího přemísťování ke složitějším způsobům a integrovaným systémům. Volba vhodného přepravního systému závisí na mnoha faktorech, jako je rozloha plochy určené k manipulaci s materiálem, charakter prostředí a vlastnosti přepravovaného materiálu.

Cílem této práce je navrhnout přepravní systém, který bude schopen autonomně měnit svou polohu z pozice A do pozice B a vyhýbat se při tom překážkám. Přepravní systém bude bezdrátově komunikovat s nadřazeným systémem a plnit zadané příkazy. Přepravní systém bude opatřen snímači pro detekci překážek a prostředky k orientaci v dvourozměrném prostoru. Navigace bude realizována sledováním vodící linie v kombinaci s RFID značkami aktuální pozice.

## 2 Analýza prostředků používaných u automatických přepravních systémů

Výroba, distribuce a skladování výrobků jsou dnes natolik mechanizované fáze, že neumožňují tvorbu další výhody jinak než racionalizací a automatizací. Automatizované systémy uplatněné v procesech přemísťování výrobků výhody přinášejí. Rozhodnutí implementovat systém automatizovaného přemísťování ve správných proporcích s ohledem na rozsah pokrytí podnikových procesů, cenu technologie a účinnost inovace se již dlouho zdá být nejlepší investicí. Dnes jsou automatizovaná vozidla integrovaná do nejrůznějších výrobních procesů a splňují požadavky na převoz a přemísťování výrobků a na jejich uskladnění.

### 2.1 Metody řízení přepravních systémů

Základními prvky jsou tranzitní dráhy a palubní systém automatizovaných vozíků. Prostřednictvím řídicí centrály, která zadává přepravní povely a řídí pohyb vozíků, je dosaženo plynulého a kontrolovaného přemísťování produktů.

#### 2.1.1 Indukční řízení

*Indukční řízení* je používáno již mnoho let a dosáhlo vysokého stupně spolehlivosti. Nevýhodou tohoto typu řízení je nutnost fyzického zásahu do podlahy pracoviště, a také komplikované modifikace trasy automatického přepravního systému. Naopak velkou výhodou je vysoká spolehlivost tohoto typu řízení.

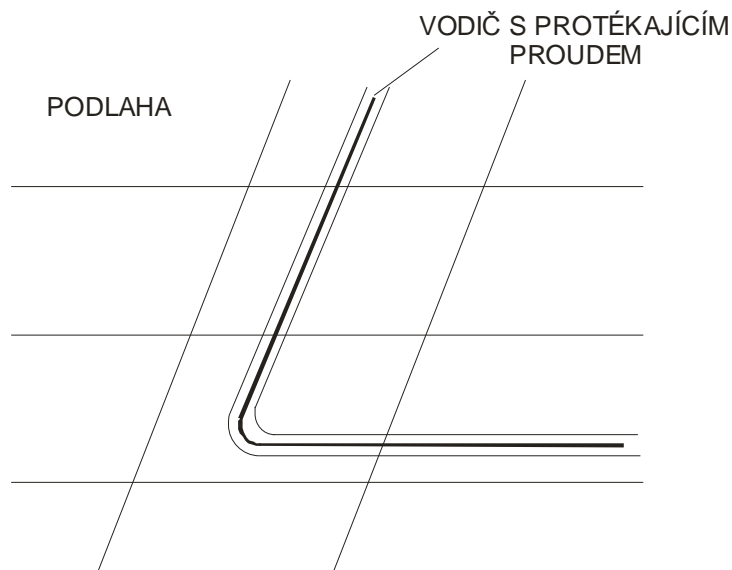
Princip spočívá v umístění drážek v podlaze o rozměrech přibližně 10 x 20 mm. Do drážek je zaveden jednopólový vodič napájený proudem o konstantní frekvenci. Tento vodič vyvolává elektromagnetické pole, které je zachycováno řídicími anténami vozíku, které korigují trajektorii, čímž vozík udržuje stále v řízené dráze.



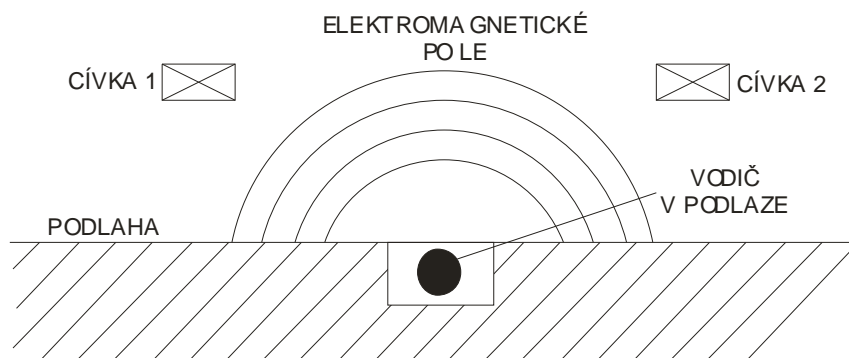
*Obr. 2.1 Princip zavedení vodiče do podlahy v případě indukčního řízení*

Tento systém může být používán v jakémkoliv prostředí, i venkovním, a lze jej použít bez problémů souvisejících se změnami nebo rozšiřováním systému. Alternativně může být použita

pasivní řídicí síť, která je tvořena lepicí páskou přilepenou na podlahu. Kontrolní jednotka instalovaná sériově do vozíků umožňuje virtuálně kopírovat zatáčky nebo odbočky bez použití řídicí sítě přilepené na podlaze.



*Obr. 2.2 Náčrt indukční vodící linky v podlaze*



*Obr. 2.3 Elektromagnetické pole vodícího vodiče*

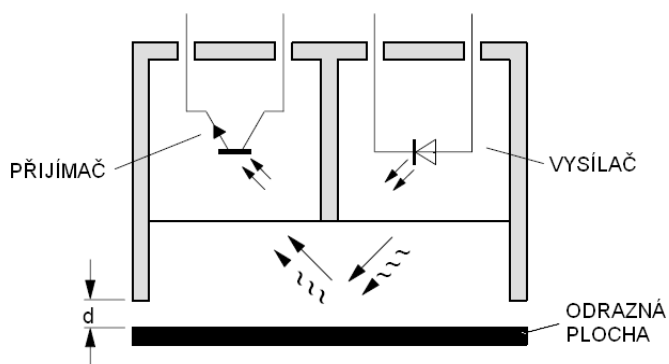
V podvozku manipulačního vozíku jsou umístěny dva indukční snímače, které sledují elektromagnetické pole tvořené průchodem střídavého proudu s konstantní frekvencí vodičem zabudovaným v podlaze. Systém má za úkol měnit směr vozíku tak, aby byla oběma indukčními snímači detekována stejná hodnota elektromagnetické indukce. Pomocí komparátoru jsou tedy porovnávány analogové hodnoty z obou snímačů.

## 2.1.2 Optické řízení

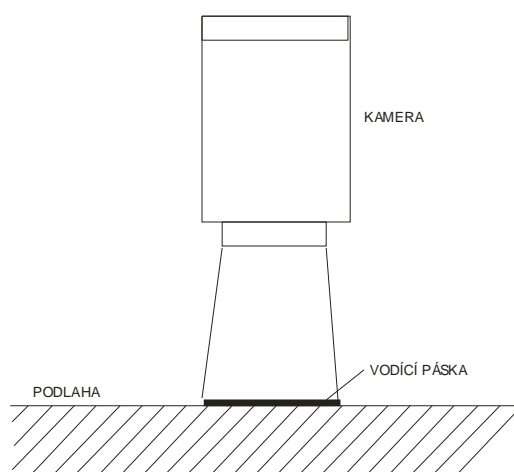
Princip *optického řízení* je obdobný jako u indukčního řízení. Na rozdíl od indukčního řízení není v podlaze zařezána drážka pro vodící kabel, ale na podlaze je umístěn reflexní pruh, který určuje trasu vozíku. Vodící trasa je snímána fotosenzory (fotodiodami či fototranzistory). Jinou alternativou je možnost sledování čáry videokamerou zabudovanou v přední části vozíku.



Obr. 2.4 Princip optického řízení

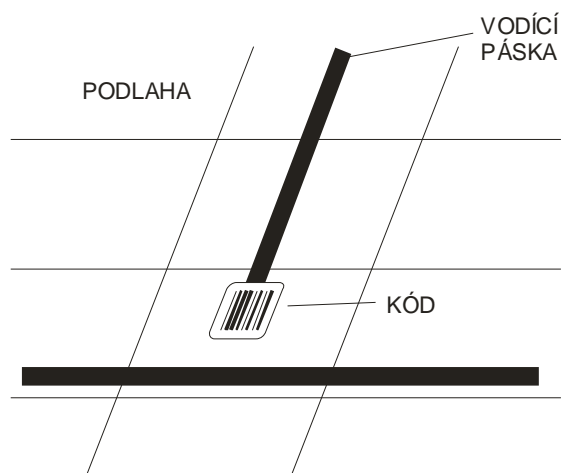


Obr. 2.5 Odrazový detektor vodící linky



Obr. 2.6 Snímání reflexní linky kamerou

Výhodou této metody je snadná a rychlá instalace vodícího proužku a především jednodušší modifikace dráhy. Tuto metodu ale není vhodné použít v provozech, ve kterých jsou kladeny velké nároky na fyzické zatížení podlah. Dochází k rychlému opotřebení vodícího pruhu (sedření pruhu, zašpinění, pod.).



*Obr. 2.7 Identifikace křižovatky pomocí čárového kódu*

Další variantou je kombinace optické navigace s čtečkou čárových kódů. Na „křižovatkách“ vozík rozhoduje o směru na základě čárového kódu. Čárovým kódem je jednoznačně určena pozice křižovatky a přesná poloha robota.

### **2.1.3 Metoda sledování referenčních bodů**

Tato metoda je použitelná pro úzké prostory. Jedná se o ekonomický způsob navádění vozíků, kdy vozík při pohybu snímá pomocí čtečky RFID čipů jejich kódy. Na základě těchto kódů rozpozná vlastní aktuální pozici. Vozík je samozřejmě vybaven snímači pro detekci překážek.

Tato metoda spočívá v umístění RFID čipů do podlahy. Vzhledem k tomu, že čipy nejsou umístěny na povrchu, nemůže dojít k jejich mechanickému poškození, tudíž je tato metoda velmi spolehlivá. Další velkou výhodou je, že vozík po přečtení RFID čipu okamžitě zjistí svou přesnou aktuální pozici.



*Obr. 2.8 Princip sledování referenčních bodů*

Uplatnění najde tato metoda u vozíků s přívěsy, a především lze tuto metodu využít u výtahových systémů (pro sklady s více patry).

Značky jsou od sebe rozmístěny ve vzdálenosti 1m – 3m. V případě použití gyroskopu ve vozíku je možné značky rozmístit ve vzdálenostech až 10m.

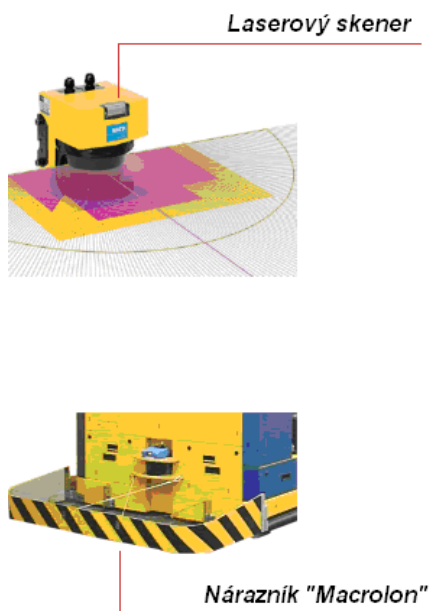
#### 2.1.4 Laserové řízení

**Laserové řízení** bylo vyvinuto v posledních letech a nabízí alternativu k indukčnímu systému řízení. Je založeno na monitorování odrazových prvků připevněných na stěnách nebo na sloupech prostřednictvím čtecí rotující laserové hlavy namontované na vozíku, která provádí triangulační orientaci a zjišťuje referenční polohu.



Obr. 2.9 Princip laserové orientace

Čtecí hlava je schopna provést šest otoček kolem své osy za sekundu. Vozík tedy sleduje trajektorii dráhy podle předem stanovené mapy dráhy zadané do palubního počítače a provádí korekci tak, aby dráha odpovídala mapě. V tomto typu lze dráhy velice snadno měnit a rozšiřovat.



Obr. 2.10 Ukázka laserových skenerů



LGV System je automatický vozík s laserovým řízením, který umožňuje maximálně optimalizovat logistiku dopravy v interiérech, snížit tak náklady na pohyb a zabránit přítomnosti stálých prací na zemi. Za pomoci reflexních povrchů umístěných na různých místech skladu vozidla přes laserovou hlavu nepřetržitě ověřují svou polohu a dráhu.

Studie a rozměry instalací jsou navrhovány pomocí simulačního systému, který umožňuje zjistit dráhy, počet možných doprav a počet potřebných vozidel. Vozidlo je k dispozici v těchto dvou verzích pro manipulaci s kontejnery na válečcích ve skladovacích instalacích a pro manipulaci s paletami na konci linky.

### 2.1.5 Prostorové řízení

Jedná se o flexibilní technologii budoucnosti, která je již nyní široce používána, neboť prostorové řízení umožňuje, aby systémy přemísťování byly pružné a nezávislé na uživateli. Funguje na odometrickém principu, jako například řízení lodí nebo letadel, tedy s korekcí dráhy. Mohou být nadefinovány složité a křižující se dráhy. Odchyłky od referenční trajektorie jsou neustále kontrolovány.

Referenční body, které jsou tvořeny pasivními značkami velkými jako aspirin, se vkládají do podlahy ve vzdálenosti až 30m. Tyto značky stanovují polohu vozíku během jízdy a umožňují korekci trajektorie. Na vozíku je namontován gyroskop, který upravuje a potvrzuje správnou polohu. Vozík kopíruje předem stanovenou dráhu a podle referenčních značek upravuje trajektorii, pokud neodpovídá topologické a geometrické mapě dráhy zadané do palubního počítače. Tento systém může být používán v jakémkoliv prostředí a lze jej použít i venku.

Přepravní systémy Indumat používají mapu drah. O volbě nejkratší trasy a celkové dráze rozhoduje nejen nadřazený systém, ale také vozík, neboť se jedná o inteligentní přepravní systém a může dosáhnout cíle i bez řídicí centrály. Bezproblémová je rovněž modifikace dráhy změnou mapy v palubním počítači.

**Identifikace** - Pro orientaci vozíku jsou do tranzitních drah rozmístěny identifikační prvky rozdělené na aktivní a pasivní prvky.

**Aktivní prvky** jsou kódované značkovače (transpondery), které jsou snímány vozíkem.

**Pasivní prvky** jsou magnetické značky nebo odrazky, které slouží k rozpoznání polohy. Používají se oba typy prvků tak, aby bylo dosaženo nejlepší funkčnosti. Kromě těchto fyzických identifikačních prvků jsou používány i virtuální polohy založené na odometrickém principu.

S ohledem na podmínky při vývoji tohoto automatického přepravního systému, které nedovolují stavební úpravy podlah, není možné využít navigaci vozíku po indukční lince zapuštěné v podlaze. Dalším faktorem, který je nutné zohlednit, jsou nedostatečné finanční zdroje pro nákup laserového scanneru k prostorové orientaci. Jednoznačně nejvýhodnější alternativou se jeví optické sledování reflexního pruhu přilepeného na podlahu, v kombinaci s RFID značkami.

## 2.2 Komunikace s přepravním systémem

Regulace dopravy, přemísťování nákladu, stav baterie, stav vozíku, nouzový stav, chyby v poloze vozíku jsou funkce, které by měly být signalizovány a přenášeny na dálku od vozíků do centrály a naopak.

Strategie dispozice vozíků je založena na principu využití nejbližšího vozíku k přepravě na místo určení po optimální dráze. Kromě základního principu mohou být v případě požadavku povely pro přemísťování změněny nebo provedeny přednostní operace. Kontrola a řízení více vozíků se analyzuje jednoduše a racionálně. Modul funkčnosti prováděné činnosti je základem pro rozvoj operativního cyklu.

Zadaná dráha přichází do vozíku přímo z palubního terminálu nebo z počítače na vyšší úrovni. Po provedené činnosti se zadá činnost nová. Mohou být prováděny jednoduché činnosti nebo činnosti kombinované (from - to, from - to - from) nebo doplněné dalšími systémy (vážení - kontrola tvaru - načítání kódu atd.), před dosažením stanoveného místa určení.

Ve středně složitých systémech zadává povely činností počítač, který dohlíží na sklad, jenž je prostřednictvím sítě propojen s řídicí centrálou vozíků. Tímto on-line připojením proces přemísťování reaguje rychle a racionálně na manipulaci s jakýmkoliv integrovaným strojem (např. robotem, manipulátorem, zásobníkem, pracovní jednotkou, atd.).

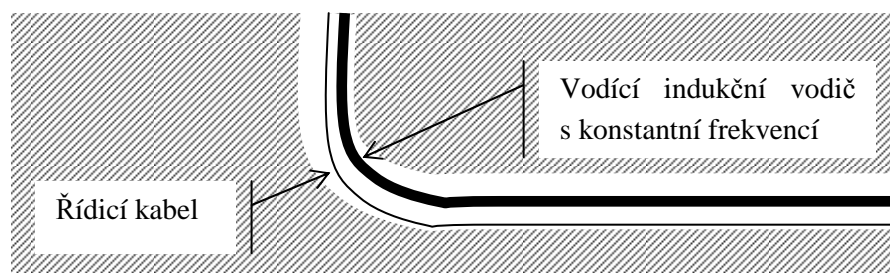
Diagnostika umožňuje okamžité rozpoznání chyb. Funkce "statistika" umožňuje individualizovat provedené přemísťování, prostoje, nouzové stavy, atd. Ve standardním provozu se do protokolů vytisknou nouzové stavy, závady, činnost a stavová hlášení.

Řízení dopravy umožňuje nerušený provoz automatizovaných vozíků. Prostřednictvím jednoduché parametrizace mohou být určeny softwarově sektory drah, kde se mohou vozíky nacházet, a vzdálenost mezi nimi může být měněna podle kapacity přepravy. Je tedy možné zvýšit kapacitu toku určitého úseku dráhy a upřednostnit určité vozíky podle požadované operativnosti. Jsou zavedeny doplňující softwarově řízené funkce, které umožňují vozíkům zvolit si vhodný úsek trasy například z důvodu havárie jiného vozíku. Provoz vozíků je možné řídit racionálně a inteligentně.

Integrace s ostatními zařízeními, jako například výtahy, dveřmi, váhami, je prováděna digitálně, sériově nebo sběrníkovým systémem. Zpracování signálů znamená pouze seřazení funkcí specifickým způsobem.

### 2.2.1 Indukční komunikace

*Indukční komunikace* je založena na stejném principu jako řízení vozíku a umožňuje přenos dat na dálku prostřednictvím řídicí centrály. Paralelní kabel s řídicím kabelem, frekvenčně modulovaným a umístěným ve stejných drážkách, umožňuje linkový přenos na dálku. Tento systém nepotřebuje žádnou infrastrukturu nebo napájení a je vhodný pro jakýkoliv typ instalace bez interferencí.



*Obr. 2.11 Nákres indukční linky s paralelním řídicím kabelem*

### **2.2.2 Radiová a infračervená komunikace**

Při radiové nebo infračervené komunikaci se přenášení děje prostřednictvím hlav reagujících na infračervené spektrum nebo RF antén pro bezdrátový přenos. Tato technologie se používá tam, kde není možné použít indukční řízení. Výměna signálů se provádí přímo a vozíky jsou ve stálém kontaktu s centrálou. Před instalací musí být provedeno měření interferencí.

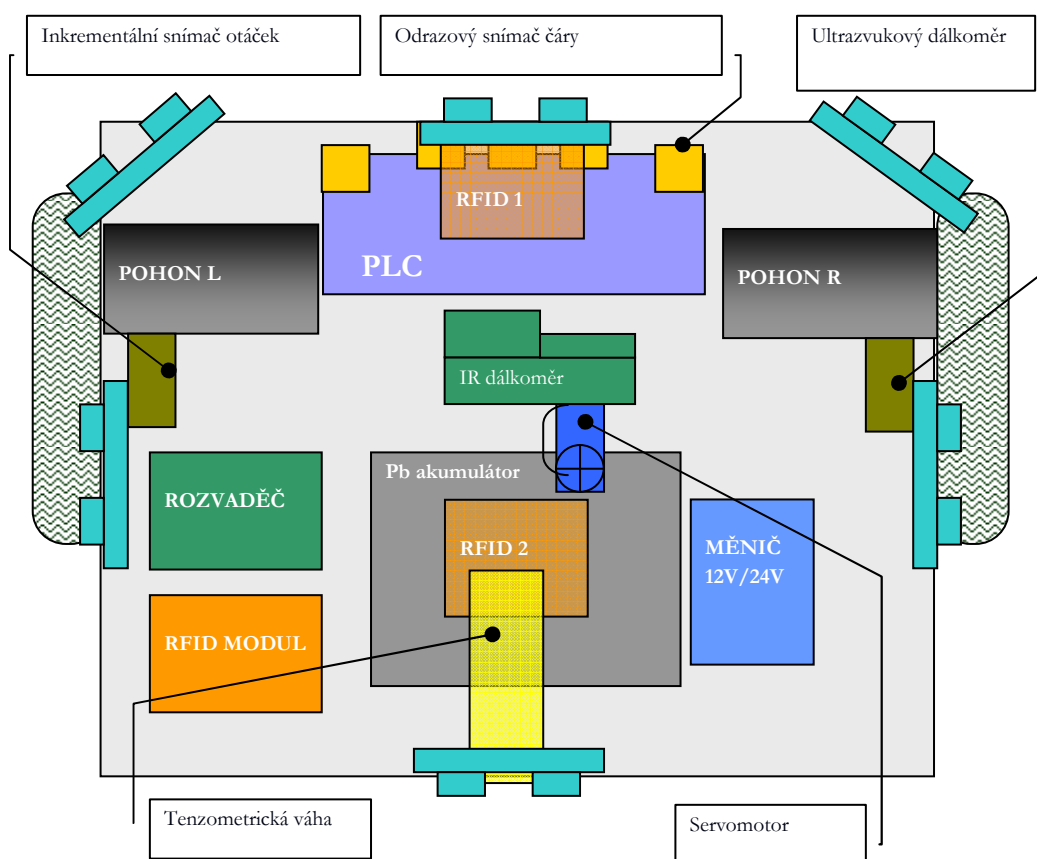
Komunikaci automatického přepravního systému s nadřazeným systémem je nutné vhodně zkombinovat s metodou navádění přepravního systému. Vyloučena byla metoda sledování indukční linky v podlaze, která by jako jediná umožňovala komunikaci systémů po pomocném řídicím vodiči. Jedinou alternativou je bezdrátová komunikace. Nadřazený systém bude s přepravním systémem komunikovat prostřednictvím Wi-Fi rozhraní.

[2], [3], [4]

### 3 Návrh automatického přepravního systému

Základním pilířem této práce je vhodný typ podvozku robota, který umožní snadné manévrování na malém prostoru. Vhodným typem, pro dané účely se stal podvozek se dvěma hnacími koly, mírně posunutými do přední části konstrukce. Stabilitu robotu obstarává jedno opěrné otočné kolo v zadní části robotu.

K pohonu slouží dva výkonné elektromotory. Řídící část obstarává programovatelný automat firmy B&R s označením X20CP1483. Celý systém včetně pohonných jednotek je napájen z jediného olověného akumulátoru o jmenovitém napětí 12V a kapacitě 18Ah. Převod napětí na 5V a 24V obstarávají dva napěťové měniče.



Obr. 3.1 Struktura rozmístění periférií automaticky vedeného vozíku

#### 3.1 Programovatelný automat

Základním řídícím prvkem celé aplikace je logický programovatelný automat firmy B&R, s označením X20CP1483. Jedná se o kompaktní, modulární PLC, osazený procesorem Intel x86

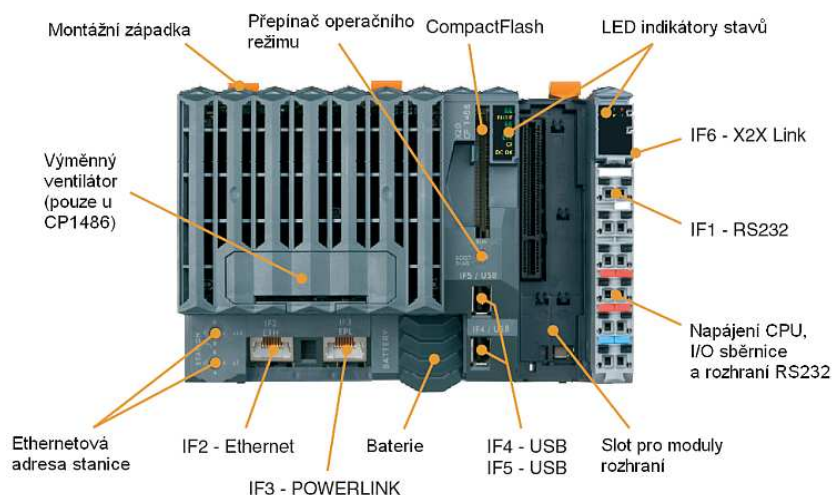
s taktovací frekvencí 100MHz. PLC X20CP1483 disponuje rozhraními USB, Ethernet, RS-232 a POWERLINK.



*Obr. 3.2 Programovatelný automat B&R s označením X20CP1483*

Technické parametry:	
CPU:	X86
Taktovací frekvence:	100 MHz
Napájení:	24 V DC (-15% / +20%)
Spotřeba PLC s 6 moduly:	9W
Operační paměť:	32 MB DRAM
Uživatelská RAM:	128kB SRAM
Aplikační paměť:	Compact Flash
Nejkratší tasková třída:	4ms

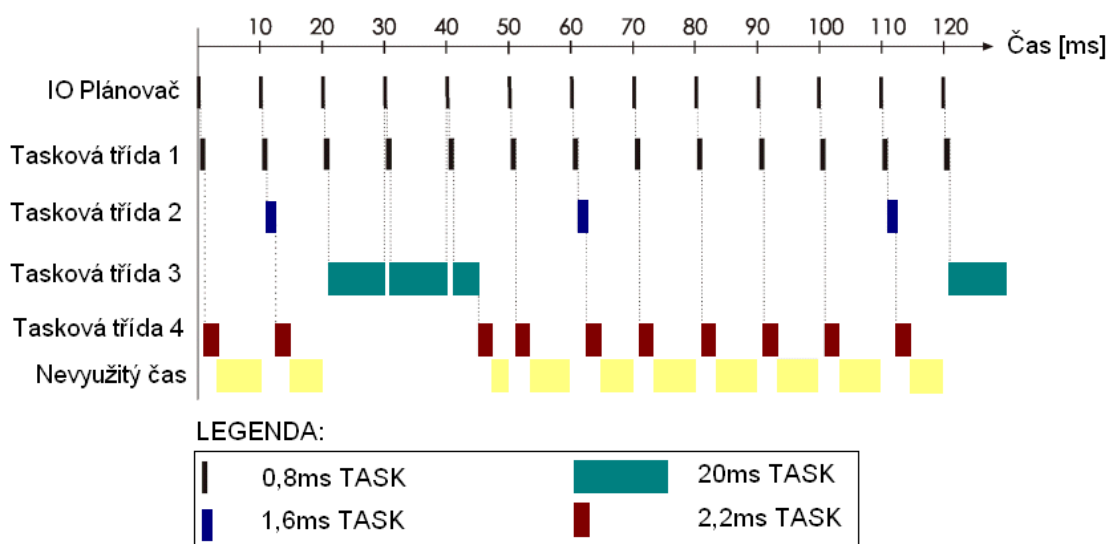
*Tab. 3.1 Technické parametry PLC X20CP1483*



*Obr. 3.3 Popis logického programovatelného automatu X20CP1483*

Programovatelné logické automaty společnosti B&R nevyužívají ke zpracování úloh přerušení od periférií. Koncepte zpracování programů je založena na tzv. taskových třídách. Při vývoji aplikace ve vývojovém prostředí Automation Studio, je k dispozici několik taskových tříd s různou délkou cyklu. Vytvořené části programu lze v závislosti na délce zpracování a prioritě spouštění řadit do jednotlivých tříd. Priorita taskových tříd klesá s rostoucím číslem třídy. Doba nejkratší taskové třídy modelu X20CP1483 činí 4ms.

Na obr. 3.4 je znázorněn princip zpracování úloh, využívající multitasking. Multitasking znamená zpracování více úloh současně. Ve skutečnosti tímto systémem nelze zpracovávat více úloh v jeden okamžik, pouze je možné rozpracovanou úlohu dočasně přerušit, uložit do zásobníku výsledky dosavadního zpracování, a začít zpracovávat úlohu jinou. Systém zpracovává 4 úlohy, z nichž každou zpracovává jiná tasková třída. Třída 1 má délku 10ms, třída 2 má délku 50ms, třída 3 je zpracovávána každých 100ms a třída 4 je zpracovávána každých 10ms, ovšem pouze tehdy, pokud má k dispozici nevyužitý systémový čas. Časy zpracování jednotlivých úloh, jsou zobrazeny v legendě.



Obr. 3.4 Plánování úloh PLC

### 3.1.1 Přídavné moduly

Programovatelný automat X20CP1483 je modulárního typu, proto je nutné pro ovládání pro komunikaci s okolními snímači a akčními členy připojit potřebné moduly. Sortiment společnosti B&R nabízí analogové, digitální, signálové moduly, nebo například moduly určené ke konkrétním aplikacím, jako je řízení motorů.

K připojení modulů slouží sběrnice X2X. Jednotlivé moduly se skládají ze tří částí. Nejzákladnějším prvkem je sběrnice část, která zajišťuje komunikaci mezi modulem a CPU po sběrnici X2X. Druhou částí je samotný modul, který má galvanicky oddělenou komunikační sběrnici od vlastních vstupů a výstupů. Stav samotného modulu a jeho vstupů a výstupů je

indikován soustavou LED diod v diagnostické části modulu. Poslední částí je svorkovnice, zajišťující galvanické spojení signálových vodičů s modulem. Svorkovnici lze opatřit plastovými štítky k označení jednotlivých I/O kanálů z důvodu přehlednosti.



Obr. 3.5 Složení jednotlivých modulů

### Modul digitálních vstupů

Modul digitálních vstupů slouží ke rozlišení úrovně log.0 a log.1, které jsou reprezentovány napěťovými úrovněmi o velikostech 0V a 24V. Digitální vstupy jsou použity pro sledování hodnot optických odrazových snímačů a řídicích přepínačů. Výstupní hodnoty jednotlivých vstupů jsou na modulu znázorněny zelenými LED diodami.

X20 DI 9371	
Počet výstupů	12
Vstupní odpor	6,4 $\Omega$
Doba cyklu	100 $\mu$ s

Tab. 3.2 Parametry modulu X20DI9371

### Modul digitálních výstupů

Robot využívá mimo jiné ke své funkci ultrazvukové dálkoměry. Metoda měření pomocí těchto dálkoměrů je odlišná od jiných snímačů v tom smyslu, že není možné měřit současně na

všech šesti dálkoměrech, ale je nutné provádět měření v určitých časových intervalech. K tomuto účelu slouží modul digitálních výstupů, které aktivují měření na každém dálkoměru samostatně.

Další funkcí tohoto modulu je určování směru otáčení pohonných jednotek.

<b>X20 DO 9322</b>	
Počet výstupů	12
Výstupní proud	0,5A
Celkový výstupní proud	6A
Špičkový proud při zkratu	< 12A

*Tab. 3.3 Parametry modulu X20DO9322*

#### Měřicí můstek

Měřicí napěťový můstek AI 1744 slouží k připojení tenzometrické váhy, k níž je připojeno napájení 4-vodičově. Vstup měřicího můstku je diferenciální. Modul disponuje vlastním signálovým zesilovačem, tudíž lze tenzometrickou váhu připojit přímým vedením. Rozlišení 24 bitů je vynikající a umožní měřit hmotnost nákladu s velkou rozlišitelností.

<b>X20 AI 1744</b>	
Měřicí rozsah	$\pm 2$ až $\pm 16$ mV/V
Rozlišení	24 bitů
Počet vzorků za vteřinu	2,5 až 7500
Napájecí napětí můstku	5,5V

*Tab. 3.4 Parametry modulu X20DI9371*

#### Multifunkční čítačový modul s PWM

Modul X20DC4395 je univerzální čítačový modul, který umožňuje konfigurovat až 2 SSI absolutní čítače, 2 ABR přírůstkové čítače, 4 AB inkrementální čítače, 8 čítačů událostí nebo 4 PWM výstupy. Všechny tyto funkce lze aktivovat pouze v určitých kombinacích.

K měření rychlosti otáčení kol robotu jsou použity dva páry snímačů směru elektromagnetického pole, jejichž signály je nutné vyhodnocovat inkrementálním snímačem AB. V principu jsou snímány zuby ozubených kol. Rozlišení 32 bitů umožní čítači čítat až do hodnoty  $2^{32} = 4\,294\,967\,296$ . Výhodou tedy je, že ani při delší ujeté dráze nebude nutné čítač resetovat.



K řízení výkonu dvou stejnosměrných elektromotorů je zapotřebí kromě dvou digitálních výstupů pro určení směru otáčení, také dvou PWM výstupu k regulaci výkonu. Proto konfigurace modulu X20DC4395 obsahuje 2 PWM výstupy, které spínají výkonové budiče elektromotorů s frekvencí 24kHz.

<b>X20 DC 4395</b>	
Počet čítačů AB	až 4
Rozlišení čítače	16 nebo 32 bitů
Maximální vstupní frekvence	100 kHz
Vstupní odpor	18,4 kΩ
PWM výstupy	až 4
Výstupní proud	100mA/kanál
Max. frekvence	24kHz
Perioda	41,6μs – 500ms
Střída	0 – 100%
Rozlišení střídá	0,1%

*Tab. 3.5 Parametry modulu X20DC4395*

#### Signálový modul

Modul CM8281 je velmi univerzální, spojuje v sobě digitální i analogové kanály. Dva analogové kanály lze konfigurovat jako proudové či napěťové. Analogový napěťový výstup z infračerveného dálkoměru má rozsah hodnot od 0V do 3V. K měření těchto hodnot je určen analogový vstup modulu CM8281 s dostatečným rozlišením 12 bitů. Efektivních bitů při tomto měřeném rozsahu je 10. Z toho vyplývá rozlišení  $2^{10} = 1024$  hodnot na rozsahu vzdálenosti 5m. Toto rozlišení je dostatečné a proto není nutné signál z infračerveného dálkoměru zesilovat operačním zesilovačem. Analogový výstup tohoto modulu je převeden na signál s proměnnou šířkou pulsu a dále určen k řízení úhlu otočení modelářského serva.

Digitální kanál modulu CM8281 má funkci čítače. Jako jediný z nabídky modulů firmy B&R disponuje měřením šířky pulsu. Měření šířky pulsu probíhá následovně. Čítač je inkrementován oscilátorem, jehož frekvenci lze zvolit v rozsahu od 187,5kHz do 48MHz. Zásobník čítače má šířku 16 bitů, vhodně zvolenou frekvencí oscilátoru lze nastavit požadované rozlišení měření, s ohledem na zpracováváný signál.

<b>X20 CM 8281</b>	
Počet vstupů k měření šířky pulsu	1 (Vstup č. 4)
Minimální délka pulsu	20μs
Minimální prodleva mezi pulsy	100μs
Frekvence interního čítače	187,5kHz až 48MHz
Velikost čítače	16 bitů
Vstupní odpor	7,18kΩ

*Tab. 3.6 Parametry modulu X20CM8281*

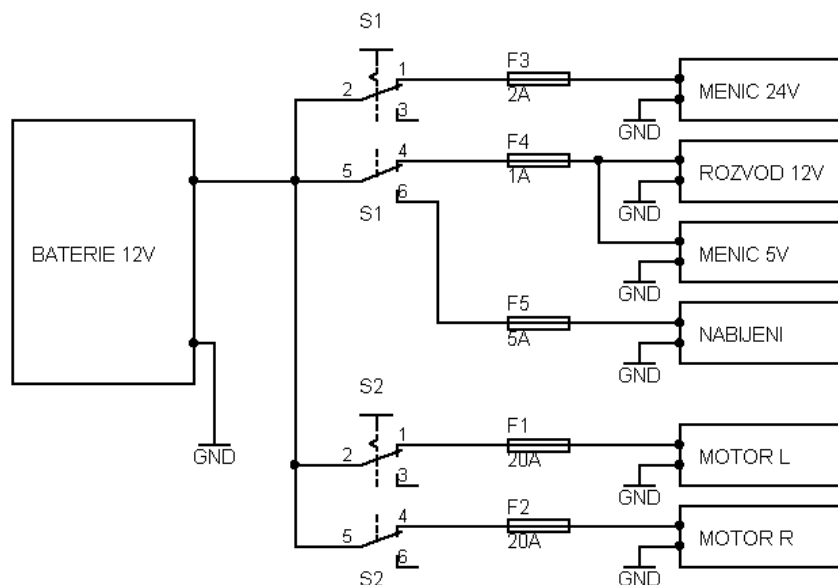
## 3.2 Napájecí soustava

Napájecí soustava tvoří jednoznačně nejdůležitější součást tohoto mobilního přepravního prostředku. Vzhledem k tomu, že nelze napájet všechny periferie přímo z olovené baterie jmenovitým napětím 12V, je nutné provést konverzi napěťových úrovní. Kromě napětí baterie 12V pro budiče motorů a čtečku RFID čipů, bylo nutné vytvořit napětí 24V k napájení PLC a některých dalších periférií a napětí 5V pro napájení ostatních snímačů. Nejlepší variantou pro konverzi napěťových úrovní jsou napěťové měniče, a to z důvodu velmi vysoké účinnosti, pohybující se v rozmezí 70% - 90%.

### 3.2.1 Výkonová část

K hlavnímu rozvodu elektrické energie, uvnitř robotu, slouží výkonová část elektroinstalace. Napájecí vodiče o průřezu 2,5mm<sup>2</sup>, jimiž protéká proud z akumulátoru k výkonovým perifériím, jsou jištěny pojistkami.

Robot disponuje dvěma dvojpólovými přepínači, jedním dvoupolohovým a druhým třípolohovým. Třípolohový přepínač S1 zajišťuje napájení napěťových měničů v poloze II a propojení baterie s napájecí zásuvkou v zadní části robotu v poloze I. Dvoupolohový přepínač s označením S2 slouží ke spínání výkonových budičů elektromotorů, z důvodu vysokého proudového namáhání spínacích kontaktů, jsou využity oba póly přepínače. Jestliže se robot uvede do pohybu vlivem chyby v programu, během testování, lze odpojit pouze elektromotory a všechny komponenty robotu zanechat spuštěné. Následně lze snadno identifikovat příčinu chyby.



Obr. 3.6 Blokové schéma napájecí soustavy

Systém jištění všech zařízení robotu proti účinkům nadproudů je realizován sadou 5 pojistek, uchycených na levém elektromotoru, v přední části robotu tak, aby byly snadno dostupné. Každá z pohonných jednotek je jištěna samostatnou pojistkou pro jmenovitý proud 20A. Oba napěťové měniče jsou rovněž jištěny nezávisle na sobě. Měnič napětí z baterie na 5V a rozvod napětí 12V jsou jištěny pojistkou pro jmenovitý proud 1A a měnič napětí z baterie na 24V je jištěn pojistkou pro proud 2A. Poslední pojistkou je nadproudová ochrana pro nabíjecí 12V zásuvku v zadní části robotu.

Napětí [V]	Zařízení	I [mA]	P [W]	I <sub>CELK</sub> [mA]	P <sub>CELK</sub> [W]
5V	Wi-Fi vysílač/přijímač	506	2,53	571	2,86
	5 ultrazvukových senzorů	14	0,07		
	IR dálkoměr	31	0,16		
	Servomotor	20	0,10		
12V	2 budiče motorů	74	0,89	169	2,03
	RFID čtečka	95	1,14		
24V	PLC	380	9,12	512	12,29
	Detektor čáry	92	2,21		
	2 rotační snímače	40	0,96		
SUMA			17,17	η = 82,71%	
12V	Proud z akumulátoru	1730	20,76		

Tab. 3.7 Spotřeba periférií

Tab. 3.7 znázorňuje naměřené hodnoty všech spotřebičů, které jsou součástí robotu. Nejprve byl naměřen celkový odběr proudu z akumulátoru, který činil 1,73A. Hodnota tohoto proudu kolísá v závislosti na využití periférií. Před nastartováním PLC klesla hodnota proudu na hodnotu 1,51A. Proud, tekoucí ostatními zařízeními, jsou měřeny v klidovém stavu, např. u čtečky RFID stoupá odebíraný proud při čtení karty z 95mA až na 135mA. Celková potřeba robotu, bez spuštěných elektromotorů pohybuje okolo 21W. Celková účinnost přenosu energie celé soustavy, včetně napěťových měničů, je získána podílem výstupního ke vstupnímu výkonu a její hodnota je 82,71%.

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \cdot 100\% = \frac{17,17W}{20,76W} \cdot 100\% = 82,71\%$$

### 3.2.2 Napěťové měniče

Ke konverzi napěťových úrovní v přepravním systému slouží dva napěťové měniče, z nichž první měnič je produktem firmy Kensington, který zajišťuje napětí 24V a druhý je konstruován s obvodem spínaného regulátoru LM2596.

Jedná se o univerzální napěťové měniče o dostatečném výkonu k napájení všech periférií přepravního systému. Měnič Kensington (viz. Obr. 16) je dodáván společně se sadou redukci s různými koncovkami (viz. Obr. 17) s různým napěťovým výstupem. Vzhledem k tomu, že nebyly k dispozici všechny typy koncovek, bylo nutné zjistit jejich vnitřní zapojení a provést patřičné úpravy k dosažení požadovaného výstupního napětí.

#### Parametry měniče

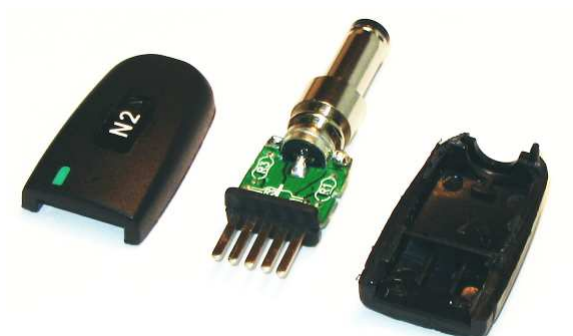
- vstupní napětí 11 – 16V DC
- výstupní napětí 3 – 24V DC
- výkon max. 70W
- výstupní proud max. 3,5A



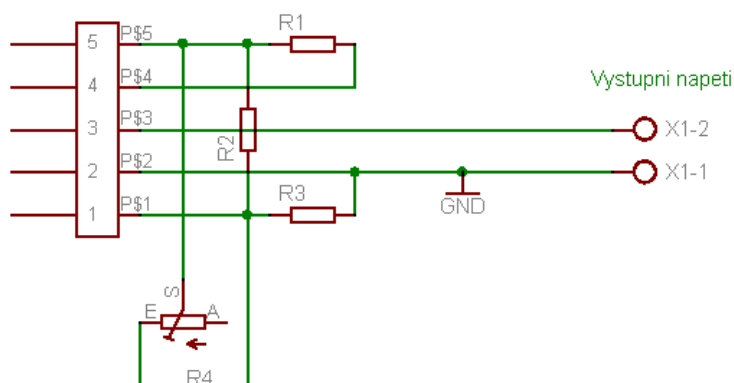
*Obr. 3.7 Nákres indukční vodící linky s paralelním řídicím kabelem*

Aby bylo možné získat přesná napětí podle vlastních požadavků, bylo nutné zjistit vnitřní zapojení koncovek a provést patřičné úpravy. Základem koncovek je napěťový dělič složený ze tří

rezistorů. Vzhledem k tomu, že nebylo k dispozici vnitřní zapojení celého napěťového měniče, hodnoty rezistorů byly nahrazeny nejprve potenciometry a experimentálně byla zjištěna závislost výstupního napětí na změnách odporů potenciometrů.



Obr. 3.8 Rozložená koncovka napěťového měniče



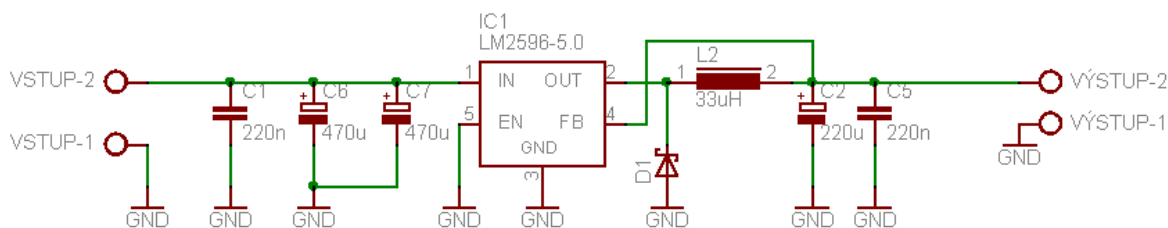
Obr. 3.9 Schéma zapojení koncovky napěťového měniče

U[V]	R <sub>1</sub> [Ω]	R <sub>2</sub> [Ω]	R <sub>3</sub> [Ω]	I <sub>max</sub> [A]	I <sub>test</sub> [A]
24	2320	0	750	2,9	2,2

Tab. 3.8 Hodnoty rezistorů a výstupních proudů měniče

Hodnoty rezistorů napěťového děliče v závislosti na požadovaném napětí jsou zobrazeny v tab. 3.8. Součástí tabulky je rovněž maximální dovolené zatížení měniče při napětí 24V, včetně hodnoty proudu při zatížení, která byla experimentálně ověřena.

Měnič s obvodem LM2596-5.0 slouží k napájení snímačů a bezdrátového přístupového bodu napětím 5V. Jedná se o snižující spínaný regulátor pracující na frekvenci 150kHz. Obvod odpovídá doporučenému zapojení výrobce, doplněného o blokovací kondenzátory na vstupu a výstupu. Měnič je navržen pro výstupní proudy maximálně 3A a výrobce zaručuje hodnotu výstupního napětí 5V s tolerancí  $\pm 4\%$ .



Obr. 3.10 Schéma zapojení měniče s obvodem LM2596

Účinnost měniče udává výrobce obvodu typicky 80%. Maximální zatížení měniče je odhadnuto na hodnotu výstupního proudu 2A. Ztráty měniče tedy nepřekročí 2W.

$$P = P_{IN} - P_{OUT} = U_{IN} \cdot I_{IN} - U_{OUT} \cdot I_{OUT} = \frac{(100 - \eta)}{100} \cdot U_{OUT} \cdot I_{OUT} = \frac{(100 - 80)}{100} \cdot 5V \cdot 2A = 2W$$

V případě použití lineárního stabilizátoru 78S05 by ztráty vzrostly až na 14W.

$$P_{7805} = (U_{IN} - U_{OUT}) \cdot I_{OUT} = (12V - 5V) \cdot 2A = 14W$$

Energie konvertovaná napěťovými měniči je dále předávána periferiím prostřednictvím rozvaděče, tvořeného třemi řadami šroubovacích svorkovnic o napětích 5V, 12V a 24V.

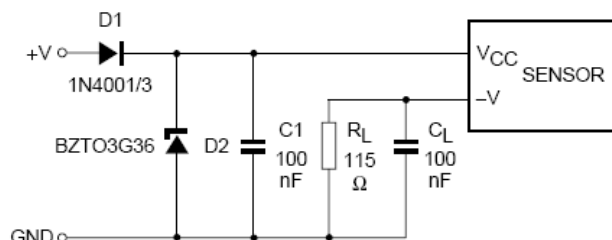
### 3.3 Snímače fyzikálních veličin

Neodmyslitelnou součástí přepravního systému jsou snímače, které umožňují nejen kontrolu správné funkce všech komponent robota, ale především slouží k zajištění bezpečnosti při provozu. Robot potřebuje ke své funkci mimo jiné inkrementální snímače polohy kol, snímače k měření vzdálenosti a snímače ke sledování požadované trajektorie.

Celý systém je řízen logickým programovatelným automatem, jehož digitální vstupy a výstupy pracují s napěťovými úrovněmi 0V a 24V. Z finančních důvodů nebylo možné zakoupit průmyslové snímače, které pracují se stejnými napěťovými úrovněmi, tudíž bylo nutné provést úpravy použitých snímačů a konverze napěťových úrovní.

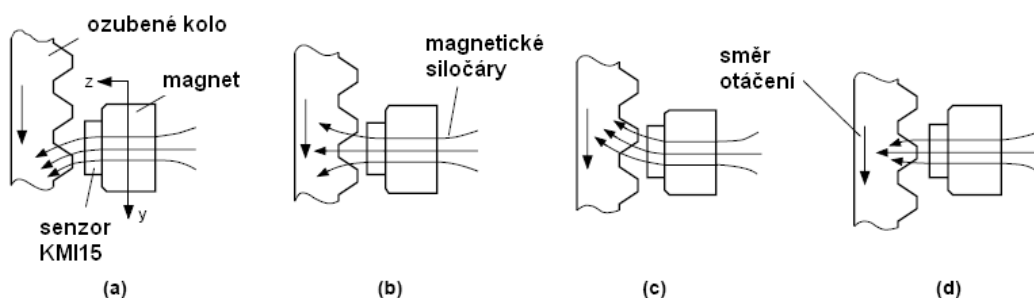
### 3.3.1 Inkrementální snímač

K měření otáček kol jsou použity dva páry digitálních proudových senzorů změny toku magnetického pole KMI 15. Tento typ je výhradně určen ke snímání zubů ozubených feritových kol, která jsou součástí pohonu robotu. Výhodou těchto snímačů na rozdíl od optických snímačů, je vysoká odolnost vůči nečistotám.



Obr. 3.11 Testovací obvod KMI 15

Na obr.3.11 je zobrazeno výrobcem doporučené zapojení, obvod se chová jako proudový zdroj, při hodnotě log.0 teče obvodem proud o velikosti 7mA, naopak při hodnotě log.1 jím protéká proud 14mA.



Obr. 3.12 Funkce snímače KMI 15

Vzhledem k tomu, že výstupy snímačů KMI 15 jsou připojeny k napěťovým vstupům čítače AB modulu DC4395 programovatelného automatu, je nezbytné převést proudové úrovně na napěťové.

Ve schématu na Obr.3.13 je zobrazen jeden pár snímačů KMI 15. Snímače jsou napájeny napětím 24V. K převodu proudu na napěťové úrovně 0V a 24V slouží dvojité operační zesilovač LM358 v zapojení komparátoru bez hystereze. Referenční napětí 1,82V je získáváno z napěťového děliče tvořeného rezistory R1 a R5.

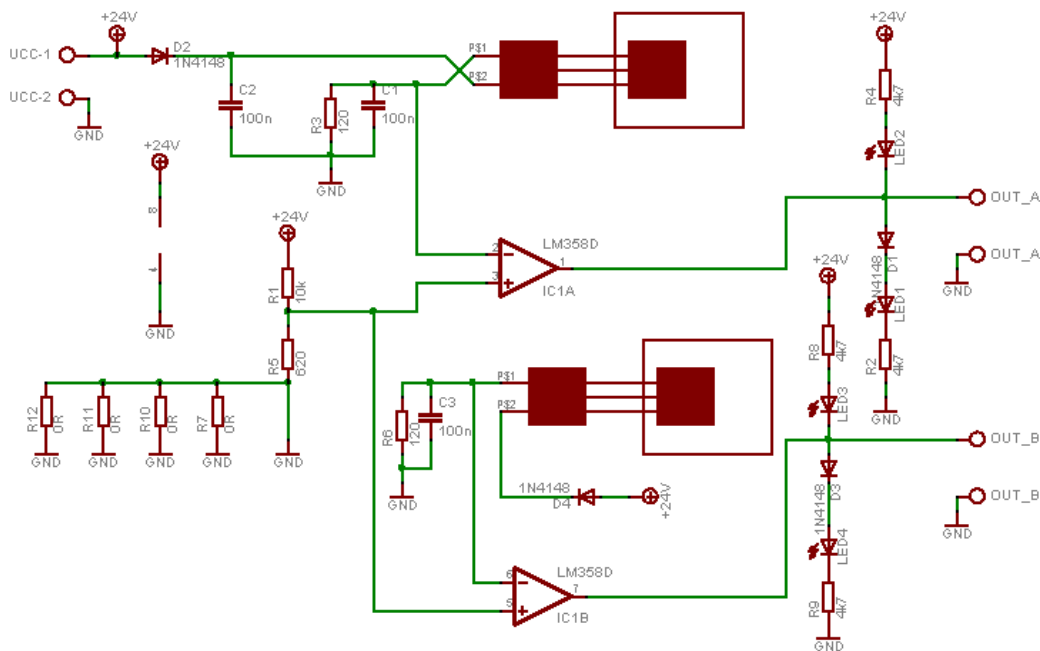
$$U_{REF} = \frac{R_5}{R_1 + R_5} \cdot U_{cc} = \frac{620\Omega}{(10^4 + 620)\Omega} \cdot 24V = 1,4V$$

Porovnávání hodnoty napětí jsou snímány z rezistorů R3 a R6 o hodnotách 120Ω.

$$U_{\log,0} = R_3 \cdot I_7 = 120\Omega \cdot 7 \cdot 10^{-3}V = 0,84V$$

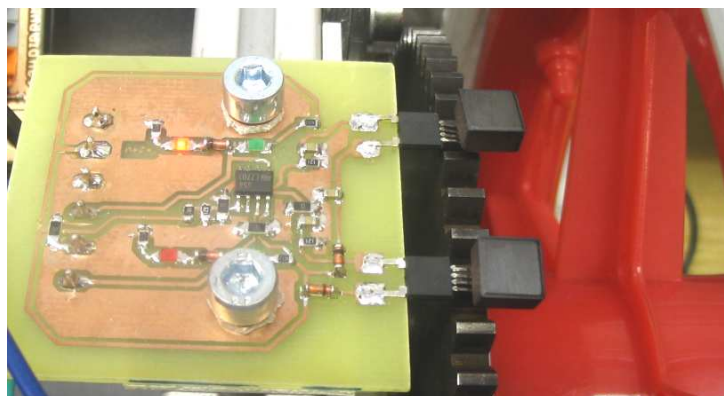
$$U_{\log,1} = R_3 \cdot I_{14} = 120\Omega \cdot 14 \cdot 10^{-3}V = 1,68V$$

Za účelem snadné kalibrace je modul opatřen indikačními LED diodami, indikujícími stav výstupních úrovní jednotlivých senzorů.



*Obr.3.13 Schéma zapojení snímače otáček*

Snímač je nutné vhodně uchytit na kostru robotu tak, aby magnetické snímače KMI15 byly nad zuby ozubeného kola vzdáleny maximálně 2mm (viz. Obr. 3.14). Snímače musí být umístěny tak, aby byl současně jeden snímač nad zubem, a druhý nad mezerou, aby bylo možné správně detekovat směr otáčení čítačovými vstupy X20DC4395.



*Obr. 3.14 Modul Inkrementálního snímače uchyceného na kostře robotu*



Použité ozubené kolo disponuje 75 zuby, kvadrurní čítače tedy detekuje 300 impulsů za jednu otáčku.

Čítače modulu X20DC4395 mají datovou šířku 32 bitů, v kladné části využijeme 31 bitů, což znamená  $2^{31} = 2\,147\,483\,648$  pulsů. Robot je tedy schopen urazit vzdálenost vpřed přibližně 6 409,5km aniž by bylo nutné resetovat čítač.

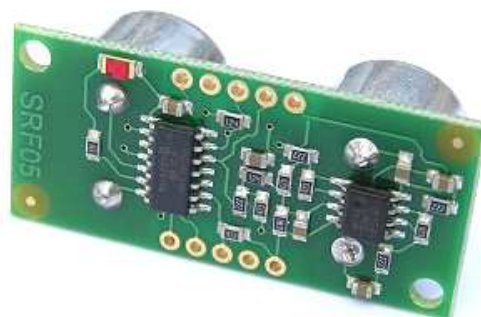
$$l_{31} = \frac{x_{31} - 1}{300} \cdot o = \frac{2\,147\,483\,648}{300} \cdot 0,8954m = 6409,5km$$

Tato hodnota je značně předimenzovaná, ale pokud bychom využívali čítač s datovou šířkou pouze 16 bitů, klesla by možnost měření ujeté vzdálenosti na pouhých 96,1m.

$$l_{15} = \frac{x_{15} - 1}{300} \cdot o = \frac{32\,767}{300} \cdot 0,8954m = 97,8m$$

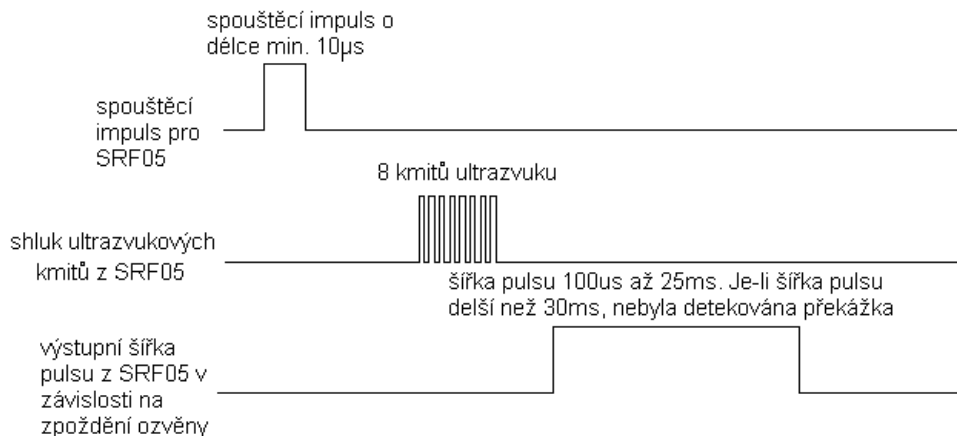
### 3.3.2 Ultrazvukový dálkoměr SRF05

K měření vzdáleností od překážek slouží ultrazvukový dálkoměr SRF05 s vyzařovacím úhlem 55°, napájený napětím 5V. Rozsah měřené vzdálenosti činí 3cm až 4m.



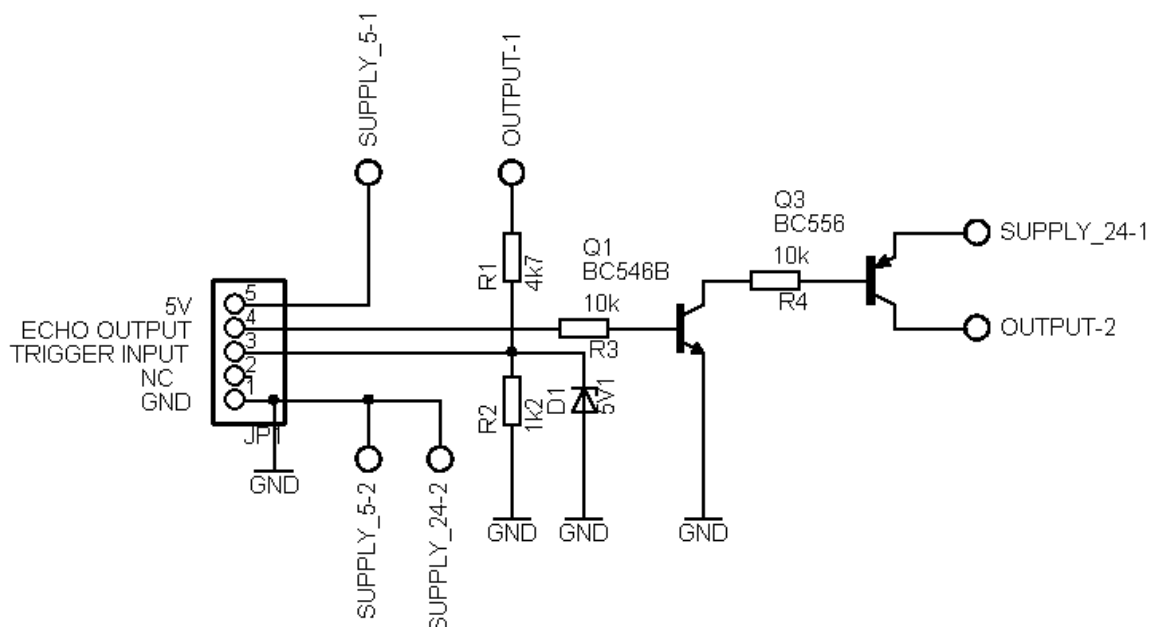
*Obr. 3.15 Ultrazvukový měřič vzdálenosti SRF05*

SRF05 disponuje v módu 1 jedním řídícím vstupem a jedním výstupem. Funkce SRF05 je následující (viz. Obr. 3.16). Po vyslání pulsu délky min. 10μs vyše zařízení 8 ultrazvukových kmitů o frekvenci 40kHz. Po přijetí ozvěny dojde k vyhodnocení zpoždění mezi vyslanými a přijatými kmity. Na základě této informace je z výstupu modulu SRF05 vyslán puls o šířce 100μs až 25ms. Pokud na výstupu naměříme šířku pulsu větší než 30ms, nedošlo během k měření k detekci překážky. Měření lze opakovat každých 50ms.



Obr. 3.16 Časovací diagram senzoru SRF05, mód 1

Jelikož je nutné vyhodnocovat naměřené hodnoty programovatelným automatem X20CP1483, je opět nutné provést konverzi napětových úrovní. Proto byl zhotoven přípravek na Obr. 3.17, který umožňuje detektoru SRF05 přijímat signály z PLC o napětové úrovni 24V prostřednictvím napětového děliče složeného z rezistorů R1 a R2. Z důvodu bezpečnosti je paralelně k rezistoru R2 připojena Zenerova dioda o průrazném napětí 5,1V. Naopak výstup SRF05 je posílen univerzálním tranzistorem Q1 s přibližným zesílením  $h_{fe} = 450$  v zapojení se společným emitorem.



Obr. 3.17 Převodník napětových úrovní mezi PLC a SRF05

### 3.3.3 Optický dálkoměr GP2Y0A700

Nevýhodou měření vzdálenosti pomocí ultrazvuku je relativně široký vyzařovací úhel. V případě požadavku na měření bodové vzdálenosti je vhodné použít dálkoměry založené na optickém principu. Jedním z dostupných modelů je infračervený odrazový senzor GP2Y0A700, který umožňuje měřit vzdálenost v rozsahu 1m až 5m. Velkou výhodou optického dálkoměru na rozdíl od sonarů je bezesporu rychlost měření



Obr. 3.18 Infračervený odrazový senzor GP2Y0A700

Výstupní charakteristika optického dálkoměru GP2Y0A700 není lineární, proto bylo provedeno měření vzdálenosti posunem překážky v kroku 10cm a zapisovány hodnoty napětí na výstupu. Byl testován odraz od bílého polomatiného materiálu a černého matného materiálu. Funkce tohoto snímače by neměla být závislá na barvě snímaného předmětu, jelikož se jedná o snímač založený na detekci tenkého infračerveného paprsku, který v závislosti na vzdálenosti odraženého předmětu dopadá na různou aktivní část infračerveného fotosenzoru. Přesto byly zpozorovány odchylky měření při vzdálenostech nad 390cm pro různé povrchy předmětů.



Obr. 3.19 Závislost výstupního napětí GP2Y0A700 na měřené vzdálenosti

Tvar výstupní charakteristiky je nevhodný z důvodu značné nelinearity, proto je nutné vygenerovat linearizační funkci pro programovatelný automat. Reálná hodnota měření vzdálenosti se pohybuje od 80cm do 500cm, proto byl zpracován pouze tento interval. Linearizace byla provedena v programu Matlab funkcí „polyfit“. Na obr. 3.20 je zobrazena aproximace 3. řádu naměřené výstupní charakteristiky GP2Y0A700. Aproximace 2. řádu je nedostatečná a aproximace vyššího, než 3. řádu je neefektivní z pohledu náročnosti výpočtu v poměru k přesnosti. Výsledná linearizační funkce 3. řádu je následující:

$$l = a \cdot u^3 + b \cdot u^2 - c \cdot u + d$$

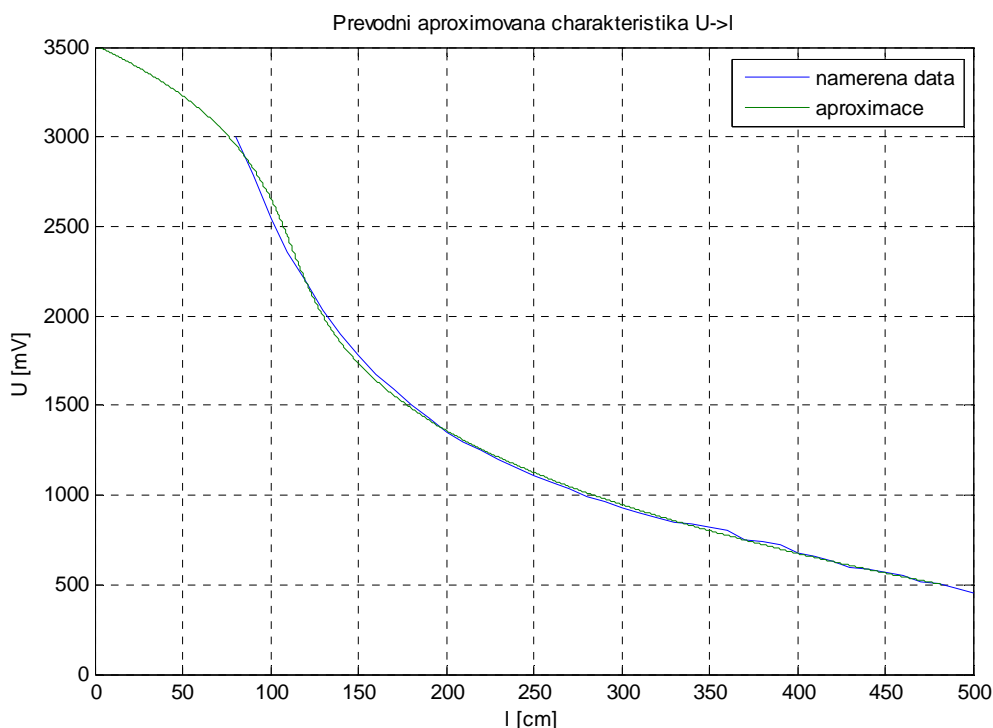
Po dosazení koeficientů:

$$l = -4,486933 \cdot 10^{-08} \cdot u^3 + 3,191609 \cdot 10^{-4} \cdot u^2 - 0,797204 \cdot u + 806,76 \quad , \text{kde}$$

*l... vzdálenost [cm]*

*u... výstupní napětí optického dálkoměru [mV]*

Rozsah měření vzdálenosti použitým dálkoměrem je v rozsahu 80cm až 5m. Je nezbytné, aby byl senzor umístěn co nejdále od přední hrany robotu a byla co nejvíce minimalizována příčina chyby měření při odrazu paprsku od objektů, nacházejících se ve vzdálenosti kratší, než 80cm.



Obr. 3.20 Aproximace 3. řádu výstupní charakteristiky optického dálkoměru

### 3.3.4 Detektor čáry

Aby mohl robot sledovat svou trajektorii, je vybaven detektorem čáry tvořeným 8 infračervenými odraznými snímači CNY70. Trajektorie je realizována černou lepicí páskou nalepenou na světlém podkladu. Šířka použité pásky je 15mm.

CNY70 je kompaktní snímač složený z infračervené diody a fototranzistoru. Modul detektoru čáry je tvořen sériovým zapojením 8 infračervených diod, napájených přes rezistor R1 napětím 24V. Fototranzistory jsou realizovány v zapojení se společným emitorem a kolektorová napětí jsou porovnávána komparátorem bez hystereze, tvořenými operačními zesilovači TL072. Proud infračervenými LED diodami snímače CNY70 je zvolen 30mA.

$$R_1 = \frac{U}{I_{LED}} = \frac{U_{cc} - 8 \cdot U_{LED}}{I_{LED}} = \frac{24V - 8 \cdot 1,25V}{0,03A} = 466,7\Omega$$

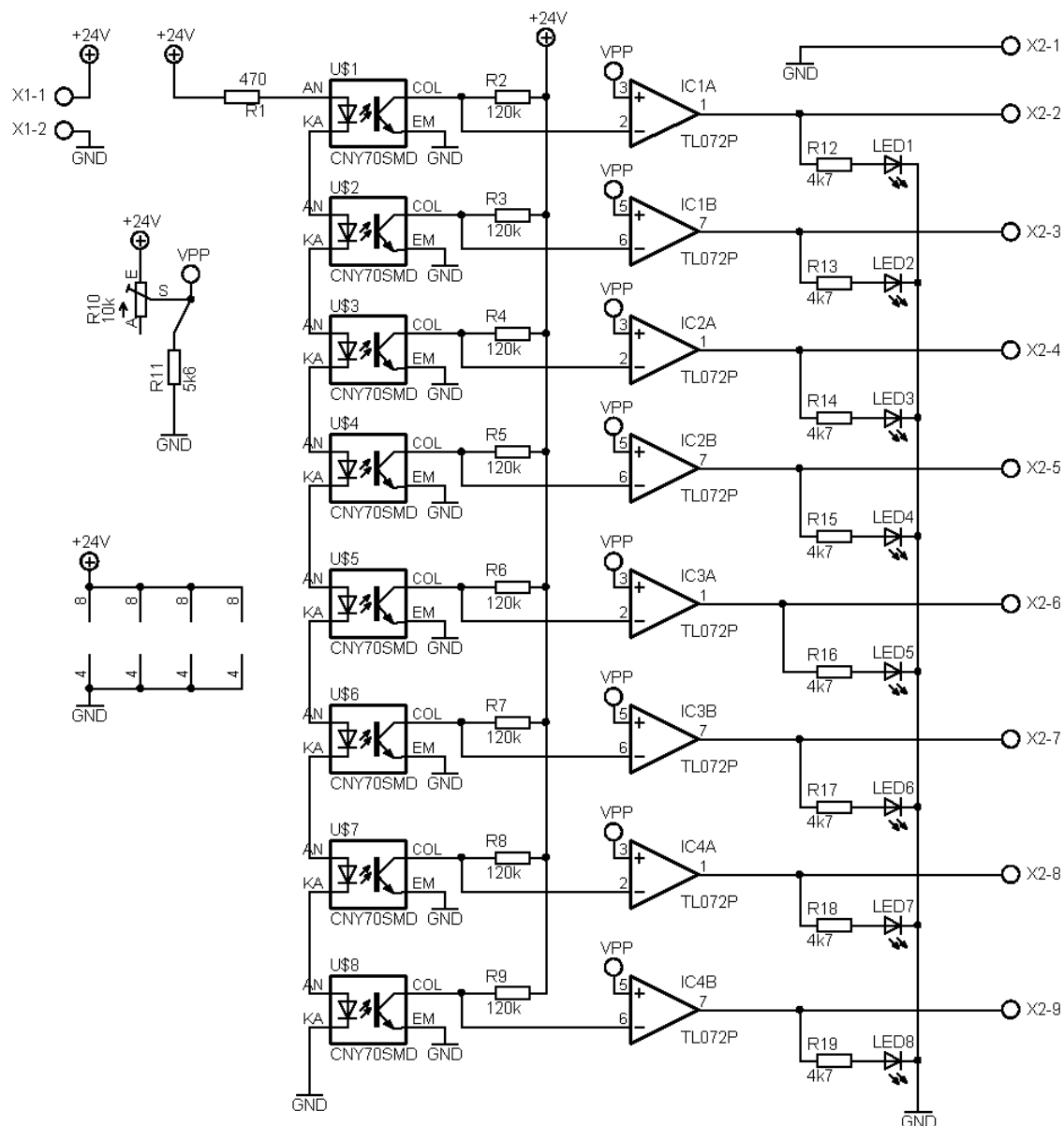
Jelikož je porovnávána hodnota z infračervených fototranzistoru přivedena na invertující vstup operačního zesilovače, výstupní hodnota komparátoru je invertována. Praktický důsledek je ten, že při odrazu infračerveného světla od světlého podkladu je výstupní hodnotou log.1. Naopak čára realizovaná černou elektroinstalační lepicí páskou světlo pohlcuje a tudíž je reprezentována úrovní log.0. Výstup komparátoru je kompatibilní se vstupy modulu digitálních vstupů PLC, které vyžadují napěťové úrovně 0V pro log.0 a 24V pro log.1.

Aby byl navržený modul detektoru čáry co nejvíce univerzální, musí být umožněno nastavit vhodný pracovní bod celého modulu pro různé typy povrchu. Detektor lze jednoduše zkalibrovat napěťovým děličem tvořeným rezistorem R11 a trimrem R10. Tento napěťový dělič slouží k nastavení referenční hodnoty komparátorů. Referenční napětí lze nastavit v rozsahu 8,62V až 24V, čímž je zajištěna velká flexibilita použití tohoto snímače.

$$U_{\min} = \frac{R_{11}}{R_{10} + R_{11}} U_{cc} = \frac{5,6 \cdot 10^3 \Omega}{(5,6 + 10) \cdot 10^3 \Omega} 24V = 8,62V$$

$$U_{\max} = U_{cc} = 24V$$

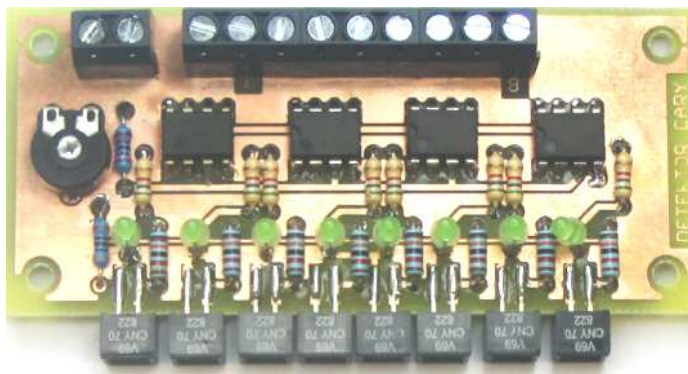
Další možností jak vhodně nastavit detektor čáry je mechanická změna výšky snímačů nad snímaným povrchem. Deska plošného spoje snímače je uchycena v posuvných drážkách v přední spodní části robotu. Výšku nad snímaným povrchem lze nastavit povolením kotvících šroubků v rozsahu 2mm až 9mm nad povrchem. Aby nedošlo k mechanickému poškození infračervených odrazných snímačů, modul je opatřen ochrannou sklolaminátovou deskou, která zabraňuje přímému styku senzorů s podlahou, v případě náhlého náklonu robotu přední částí dolů.



Obr. 3.21 Schéma zapojení detektoru čáry

Kontrola správné funkce detektoru během kalibrace je zajištěna sadou 8 LED diod, které jsou řízeny výstupy komparátorů. Na použitých zelených LED diodách vzniká úbytek napětí 1,95V, aby jimi protékal proud 5mA, je nutné předřadit rezistory o hodnotách 4410Ω, respektive 4,7kΩ z řady E12.

$$R_{LED} = \frac{U_{cc} - U_{LED}}{I} = \frac{24V - 1,95V}{5 \cdot 10^{-3} A} = 4410\Omega$$



*Obr.3.22 Modul detektoru čáry*

### 3.3.5 Tenzometrická váha

Robot disponuje tenzometrickým můstkem SP4C3-MR k určení hmotnosti nákladu v rozsahu 0 – 20kg. Princip tenzometrické váhy je založen na změně elektrického odporu odporového materiálu, vlivem deformace.

Měřicí prvek váhy je tvořen robustním hliníkovým tělesem s kruhovými výbrusy v oblasti umístěných tenzometrů. K uchycení měřicí plošiny, slouží dva páry vnitřních závitů o průměru 6mm. Můstek tenzometrické váhy má citlivost 2mV/V. Výhodou tohoto modulu je, že lze napájení připojit 4-vodičově a tím eliminovat odpor vedení a vliv okolní teploty. Hodnota nelinearity  $\pm 0,015\%$  je rovněž velmi dobrá.



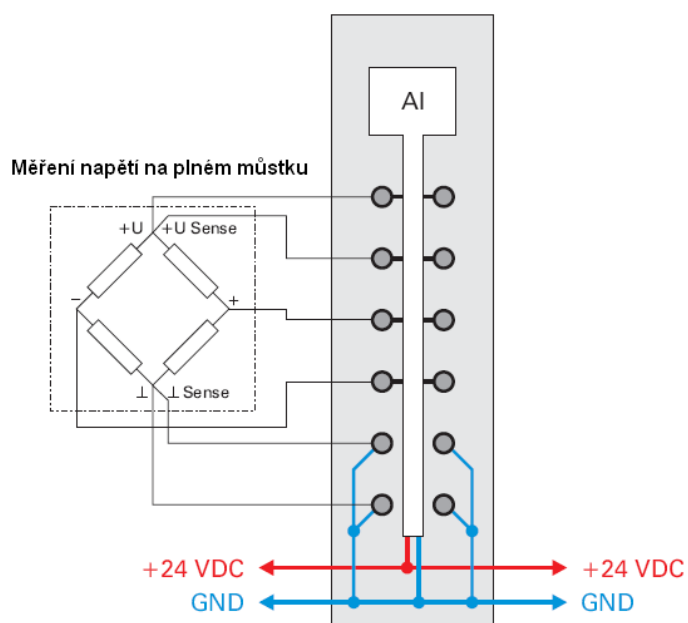
*Obr. 3.23 Fotografie tenzometrické váhy SP4C3-MR*

Tenzometrická váha je připojena k modulu X20AI1744 pomocí 6 vodičů, z nich 4 tvoří napájení můstku a dva slouží k měření rozdílu napětí (viz. Obr.3.23). Před začátkem měření je nutné měřicí modul nakonfigurovat zápisem hodnoty  $(48)_D$  do registru „ConfigOutput01“. Jedná se o registr, který lze přepisovat v programu, tudíž je možné při provozu měnit například vzorkovací frekvenci měření.

Bit	Hodnota	Význam	Popis
0 - 3	0000	2,5	Vzorkovací frekvence
	0001	5	
	0010	10	
	0011	15	
	...	...	
	1101	7500	
	1110	Synchronní mód	
	1111	Rezervováno	
4 - 5	00	16	Měřicí rozsah
	01	8	
	10	4	
	11	2	
6 - 7	00	Rezervováno	Musí být „00“

Tab.3.9 Význam bitů registru „ConfigOutput01“

Rozlišení A/D převodníku měřicího modulu je 24 bitů, přesto nikdy nelze toto rozlišení využít zcela efektivně. Společnost B&R udává v katalogovém listu při vzorkovací frekvenci 2,5Hz a měřicím rozsahu 2mV/V efektivních 18,7 bitů ( $\pm 212\ 000$  hodnot).



Obr. 3.23 Zapojení měřicího můstku pomocí 6 vodičů



Nyní provedeme kvantování naměřených hodnot. Nominální zátěž tenzometrické váhy je 20kg, citlivost činí 2mV/V a můstek je napájen napětím 5,5V. Maximální hodnota napětí na můstku tedy 11mV. Nejnižší rozlišitelná hodnota hmotnosti je při rozlišení 24 bitů 2,38mg, ve skutečnosti lze považovat za efektivních pouze  $18,7 \approx 19$  bitů. V tomto případě lze spolehlivě rozlišit hmotnost 76mg.

24-bitová hodnota hexadecimálně	24-bitová hodnota dekadicky	Napětí můstku	Hmotnost
\$7F FFFF	8 388 607	11mV	20kg
\$3F FFFF	4 194 303	5,5mV	10kg
\$00 0001	1	1,31nV	2,38mg

Tab. 3.10 Převodní tabulka tenzometrického můstku SP4C3-MR

Váha je realizována hliníkovou plošinou o tloušťce 4mm upevněnou na samotné měřící těleso v zadní části robotu. Rozměr měřící plošiny je 25cm x 56cm. Jelikož jsou výrobcem měřícího můstku povoleny rozměry plošiny pro danou kategorii vah omezeny na rozměr čtverce o stranách dlouhých 45cm, musí být části plošiny přesahující rozměr 45cm označeny. V případě přetížení váhy o 50% maximální nosnosti, která u tohoto modelu činí 20kg, dojde k trvalé deformaci měřícího tělesa. Pod vážící plošinou je po obvodu umístěn ochranný rám z hliníkových profilů, zajišťující ochranu měřícího tělesa před přetížením a následnou trvalou deformací.

## 3.4 Periferie

Kromě senzorů fyzikálních veličin je robot opatřen periferními zařízeními, které slouží jako doplněk senzorů fyzikálních veličin. Jedná se o modul řízení servomotoru, který umožní měnit horizontální úhel natočení optického dálkoměru. Druhou periferií je čtecí zařízení RFID, poskytující informaci o přepravovaném nákladu a k identifikaci úseků trajektorie robotu.

### 3.4.1 Servomotor

Aby bylo možné efektivně využít optický dálkoměr, určený k měření bodové vzdálenosti objektů, je nutné měnit úhel jeho horizontálního natočení. K tomuto účelu je přizpůsobeno modelářské servo, jehož rozsah otočení činí zpravidla 270°. Zpravidla je využíván rozsah otočení mnohem menší, krajní úhly otočení jsou rezervovány pro případ chybného řízení serva. Zpětná vazba řízení serva je zajištěna otočným potenciometrem umístěným na hřídeli serva.

Řízení serva spočívá v přivedení signálu obdélníkového tvaru s frekvencí okolo 50Hz a šířkou hrany od 900μs do 1,8ms. Šířka pulsu odpovídá úhlu natočení serva.

Pro tuto aplikaci byl zvolen osmibitový mikrokontrolér PIC12F675 společnosti Microchip, disponující pěti A/D převodníky s rozlišením 10 bitů. Tento typ byl zvolen rovněž pro své malé rozměry, velice nízkou cenu a integrovaný oscilátor na frekvenci 4MHz.

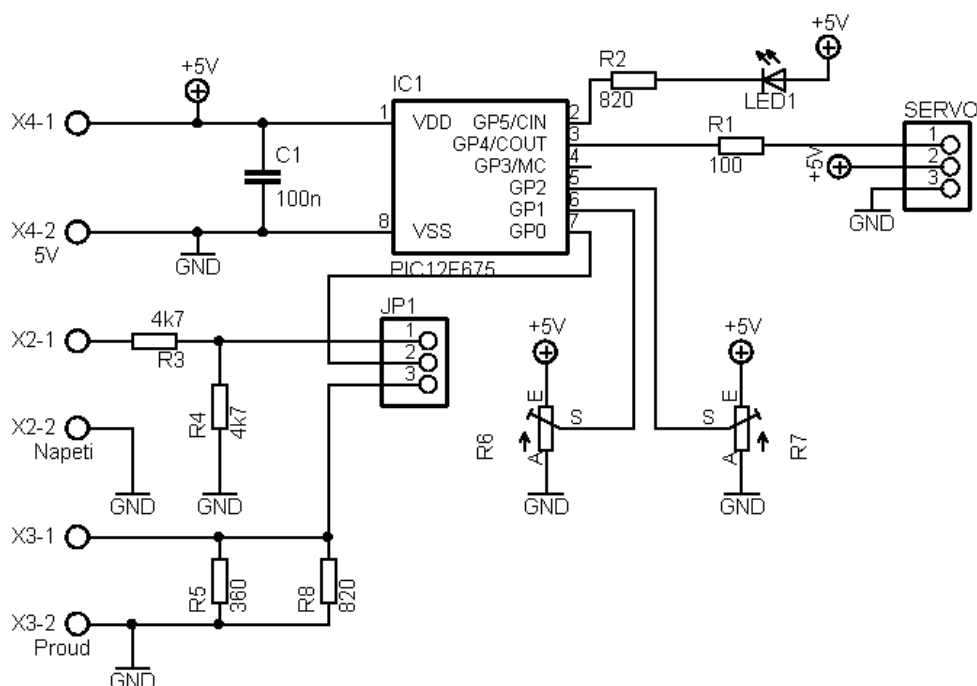


Schéma zapojení je navrženo s ohledem na maximální využití mikrokontroléru. Vstupní veličinu převodníku lze zvolit pomocí propojky JP1 na proudovou či napěťovou. Vstupní obvody převodníku jsou přizpůsobeny výstupnímu rozsahu modulu X20CM8281, který je 0-20mA v případě proudového výstupu a  $\pm 10V$  v případě výstupu napěťového. Z napěťového výstupu je využit rozsah 0 – 10V, nelze na vstup mikrokontroléru přivést záporné napětí, jinak by došlo k jeho poškození.

32

rezistoru R5. Rezistory jsou zvoleny tak, aby byl využit plný rozsah A/D převodníku PIC12F675, který je v rozsahu napětí (0;U<sub>cc</sub>); Maximální výstupní napětí z napěťového vstupu a proudového vstupu jsou následující:

$$U_{U_{\max}} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot U_{IN} = \frac{4,7 \cdot 10^3}{(4,7 + 4,7) \cdot 10^3} \cdot 10V = 5V$$

$$U_{I_{\max}} = R_5 \cdot I_{IN} = 250\Omega \cdot 20 \cdot 10^{-3} A = 5V$$

Ztráta na měřicím rezistoru proudového vstupu činí maximálně 0,1W.

$$P_{\max} = U_{I_{\max}} \cdot I_{IN} = 5V \cdot 20 \cdot 10^{-3} A = 0,1W$$

Převodník umožňuje nastavit střední polohu serva trimrem R6 v rozmezí  $\pm 12,5\%$  rozsahu otáčení.

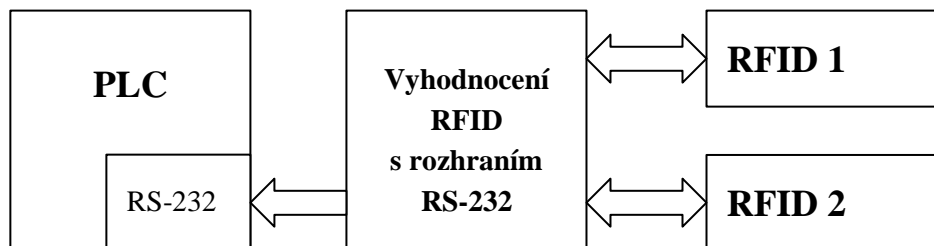
### 3.4.2 Čtečky RFID kódů

Robot využívá k detekci své polohy a identifikaci přepravovaného nákladu pasivní identifikační karty pracující na principu radiových frekvencí. Ke čtení karet slouží dvě RFID čtečky pracující na frekvenci 125kHz. Obě čtecí zařízení mají společnou vyhodnocovací část, která je k programovatelnému automatu připojena sériovým rozhraním RS-232. Čtečky jsou tvořeny cívkou čtvercového tvaru o stranách dlouhých 73mm, které jsou uloženy společně s vyhodnocovacím obvodem v pouzdru klasického domovního spínače osvětlení. Součástí čtečky je dvoubarevná LED dioda a piezoměnič, signalizující přečtení přiložené karty.

První čtečka, RFID1, je umístěna v přední části pod podvozkem robotu. Jelikož je podvozek robotu vyroben z elektricky vodivého materiálu, nelze čtečku RFID, respektive vysílací/přijímací cívku umístit v těsné blízkosti podvozku. Podvozek robotu má funkci stínění a vyzařovaný signál je výrazně tlumený. Tudíž je vytvořena mezi čtečkou a podvozkem robotu vzduchová mezera o tloušťce 2cm. Výsledkem je dosah čtení RFID karet přibližně 5cm, který umožní spolehlivě přečíst identifikační značky na podlaze.

Druhé čtecí zařízení, RFID2, je umístěno v zadní části sklopné kabiny tak, aby byla umožněna identifikace převáženého zboží po umístění na váhu. Plošina váhy tvořená hliníkovým plechem překrývá čtecí cívku přibližně z 10%, tudíž není dosah prakticky téměř omezen. Dosah čtení této čtečky se pohybuje okolo 15cm.

RFID karty mají formát bankovní platební karty o rozměrech (54 x 86)mm a tloušťce 750μm. Důležitou informací je, že RFID kartu nelze přečíst, pokud je nasměrována kolmo ke čtecí cívce.



Obr. 3.25 Blokové schéma RFID

Formát odesílané zprávy vyhodnocovací elektroniky začíná znakem „^“ a končí znakem „#“ z ASCII tabulky. Celková délka vysílané zprávy je 20 bytů. První a druhý byte informuje o čtečce, která danou RFID kartu detekovala a ostatních 16 bytů označuje samotný kód karty, který je jedinečný, daný výrobcem karty. Komunikace vyhodnocovací elektroniky s PLC probíhá po sériovém rozhraní pouze jednosměrně, PLC nevysílá požadavek na předání informace od čteček RFID. Zpráva je odeslána automaticky po přečtení RFID karty jednou ze čtecích cívek.

Byte	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
RFID1	^	0	1	kód karty																#
RFID2	^	1	0	kód karty																#

Tab. 3.11 Formát zprávy vysílané RFID zařízením

K dispozici je 10 RFID karet, které jsou využity k informaci o poloze robotu v síti trajektorií a k detekci přepravovaného zboží. Seznam kódů všech karet je uveden v tab. 3.12.

Číslo karty	Kód karty																		
	Byte	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
1		8	0	E	0	3	2	B	A	2	F	0	0	0	0	5	E		
2		8	0	E	0	3	2	7	A	5	3	0	0	0	0	4	3		
3		8	0	E	0	3	2	2	6	9	B	0	0	0	0	4	6		
4		8	0	E	0	3	2	4	6	8	A	0	0	0	0	4	6		
5		8	0	E	0	3	2	8	6	E	7	0	0	0	0	4	D		
6		8	0	E	0	3	2	8	6	F	E	0	0	0	0	5	C		
7		8	0	E	0	3	2	F	A	A	F	0	0	0	0	7	1		
8		8	0	E	0	3	2	F	A	5	A	0	0	0	0	6	0		
9		8	0	E	0	3	2	6	6	4	9	0	0	0	0	3	C		
10		8	0	E	0	3	2	F	A	4	8	0	0	0	0	5	6		

Tab.3.12 Kódy použitých RFID karet

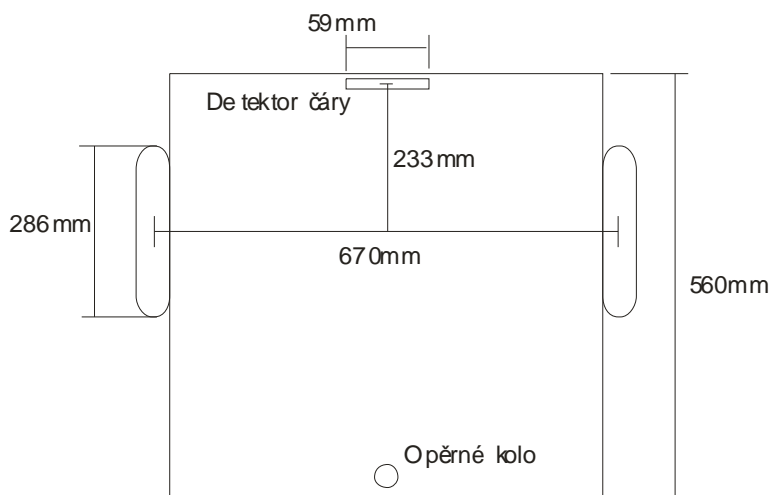
[1],[2],[7]

## 4 Řízení robotu

Velmi důležitým faktorem při výběru vhodného způsobu řízení je důkladná znalost řízeného objektu, zhodnocení zpětných vazeb řízení a stanovení vhodného rozsahu akčních veličin. Následující kapitola se bude zabývat geometrickým rozmístěním pohonných částí robotu a zpracováním informací použitých detektorů trajektorie.

### 4.1 Geometrie podvozku

Podvozek řízeného objektu má čtvercový průřez o stranách dlouhých 560mm. Stavba podvozku řízeného robotu je sestavena ze dvou pohonných kol a jednoho opěrného otočného kola, umístěného v zadní části podvozku. Osa pohonných kol není umístěna uprostřed podvozku, ale je od středu posunuta do přední části vozítka, z důvodu stability. V případě, že by byl podvozek symetrický, bylo by nutné umístit opěrná kolečka do přední i zadní části podvozku. Tato varianta s sebou nese řadu nevýhod. Nejvýznamnějšími nevýhodami jsou provoz vozítka na dokonale rovné podlaze a dalším problémem by bylo umístění snímačů vodící linie a zařízení ke čtení RFID čipů na podlaze.



Obr.4.1 Rozměry podvozku

Průměry použitých kol mírně rozdílné, jedná se o lisovaná kola určená k jiným účelům. Obvody obou kol byly tudíž určeny experimentální metodou. Obě kola byla označena ryskou, která se kryla se startovní ryskou na podlaze a celý robot rovnoměrně posunut. Následně byla odečtena ujetá vzdálenost obou kol, výsledkem byl obvod levého kola 989mm a pravého kola 968mm. Tato metoda je přesná především z hlediska zohlednění téměř všech faktorů, které na robota během pohybu působí, jedná se hlavně o stlačení pneumatik, vlivem hmotnosti robotu, při kontaktu s povrchem. Aby bylo možné s výsledky měření dále jednoduše pracovat, byl stanoven průměrný obvod kol na hodnotu 979mm a průměr kol na 286,5mm.

$$o = d \cdot \pi = 286,5 \cdot \pi = 978,7 \text{ mm}$$

Rozlišení 300 pulsů/ot. umožňuje rozpoznat posun robotu o vzdálenost 3,262mm.

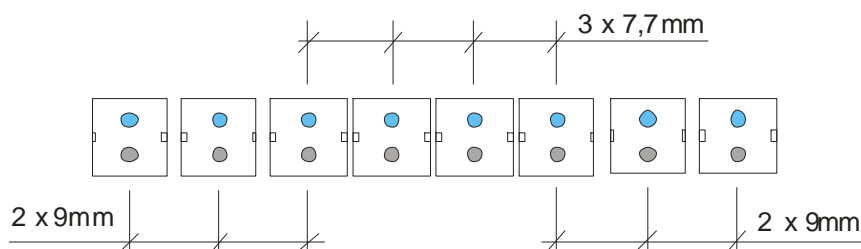
$$\Delta l = \frac{o}{300} = \frac{978,7}{300} = 3,262 \text{ mm}$$

Rozkol podvozku je 670mm, tudíž je robot teoreticky schopen kopírovat zakřivení dráhy o poloměru minimálně 670mm při pohybu kol pouze vpřed. Při menších průměrech oblouků by robot musel kolo umístěné na vnitřní straně oblouku vrátit o určitou vzdálenost zpět. Problém nastává v případě, kdy robot sleduje pouze aktuální polohu sledované křivky a nezná její další průběh.

## 4.2 Vyhodnocení sledované trajektorie

Robot vyžaduje ke správné navigaci referenční dráhu, tvořenou kontrastní linkou na podlaze. Zpravidla se jedná o černou elektroinstalační pásku, nalepenou na světlém podkladu, lze rovněž použít bílou pásku na tmavém podkladu, pohlcujícím světlo. Ve druhém případě je pro stejný algoritmus sledování čáry pouze nutné programově zrušit negaci výstupních bitů infračervených odrazných senzorů.

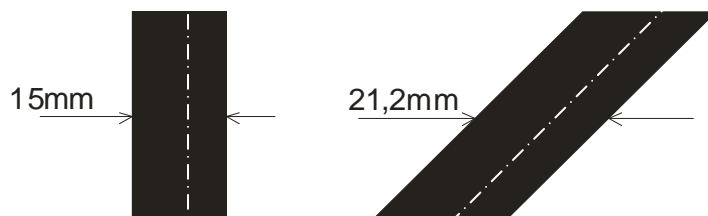
Dráha je sledována 8 infračervenými odraznými senzory v rozestupech 9mm mezi vnějšími snímači a 7,7mm mezi vnitřními snímači.



Obr. 4.2 Rozestupy odraznými snímači čáry

Rozestupy jsou zvoleny tak, aby se vlivem vyzařovaného infračerveného světla snímače navzájem ovlivňovaly co nejméně, ale současně aby byla rozlišovací schopnost co největší. Velkou roli při sledování čáry těmito snímači hraje vzdálenost od sledovaného povrchu, nelze tedy určit přesnou hranici mezi odraznou plochou a plochou pohlcující světlo, jelikož ta závisí na parametrech, které se v průběhu provozu robotu, mírně mění. Především se jedná o změnu vzdálenosti detektoru čáry vlivem kolébání robotu při prudké změně směru či průjezdu po zvlněné ploše.

Modul je navržen ke sledování čáry o šířce 15mm. Při zvoleném rozestupu snímačů a kolmé poloze snímané čáry je aktivní jeden či dva snímače, jelikož součet dvou nejkratších vzdáleností činí 15,4mm. V případě zachycení čáry pod úhlem 45° je detekována celá šířka třemi snímači.



Obr. 4.3 Znázornění detekované čáry

Požadavkem přesného vyhodnocení směru trajektorie je určení střední osy vodící linie. Při řízení robotu je důležité určit následující změnu pohybu ve smyslu změny směru jízdy. K vyhodnocení sledované trajektorie slouží jednoduchý algoritmus založený na principu zjištění počtu aktivních senzorů.

Během snímání čáry dochází k aktivaci maximálně tří senzorů současně, z tohoto předpokladu vychází následující algoritmus. Je-li zaznamenán větší počet aktivních senzorů, zůstává poslední zjištěný stav nezměněn. Detekce čtyř a více aktivních senzorů představuje křížovatku. Pokud jsou všechny senzory neaktivní, je výsledkem výpočtu předem určená hodnota znázorňující chybu, respektive ztrátu stopy.

Nejprve je sečten počet aktivovaných senzorů  $n$ , které nedetekovaly odražené světlo.

$$n = \sum_{i=1}^8 x_i$$

$n...$  počet aktivních senzorů

$x...$  stav senzoru – binární hodnota

$i...$  pořadí senzoru

V závislosti na zjištěném počtu senzorů probíhá vyhodnocení střední polohy snímané čáry.

pro  $n = 1$

$$d_1 = x_1 \cdot 7 + x_2 \cdot 5 + x_3 \cdot 3 + x_4 \cdot 1 + x_5 \cdot (-1) + x_6 \cdot (-3) + x_7 \cdot (-5) + x_8 \cdot (-7)$$

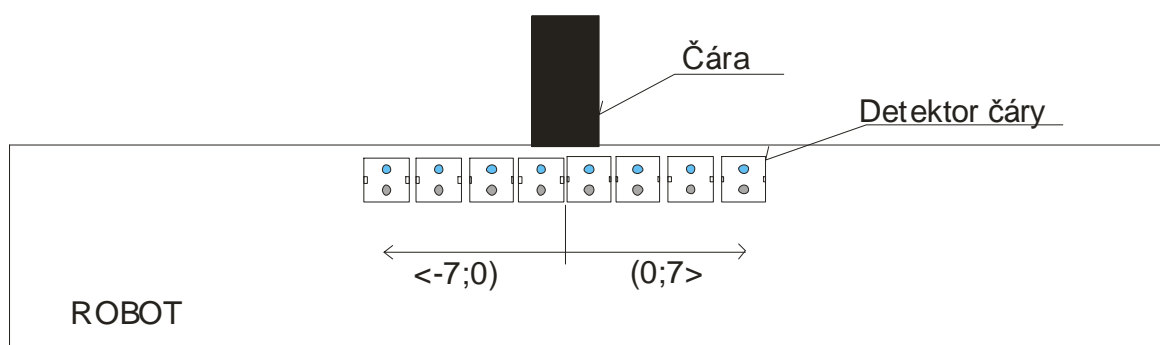
pro  $n = 2$

$$d_2 = x_1 \cdot 4 + x_2 \cdot 2 + x_3 \cdot 2 + x_4 \cdot 0 + x_5 \cdot 0 + x_6 \cdot (-2) + x_7 \cdot (-2) + x_8 \cdot (-4)$$

pro  $n = 3$

$$d_3 = x_1 \cdot 2 + x_2 \cdot 2 + x_3 \cdot 1 + x_4 \cdot 0 + x_5 \cdot 0 + x_6 \cdot (-1) + x_7 \cdot (-2) + x_8 \cdot (-2)$$

Výsledkem předchozího algoritmu je celé číslo v rozsahu hodnot  $\langle -7;7 \rangle$ , které udává vzdálenost středu čáry od požadované polohy. Celkově je možné při použití osmi odrazových senzorů rozlišit polohu čáry v 15 krocích. Požadovanou polohou se rozumí střed snímacího modulu složeného z osmi odrazných senzorů. Kladná hodnota znázorňuje vychýlení robotu do pravé části poloosy a záporná hodnota značí pozici robotu v levé poloose. Ideálním stavem je nulová hodnota indikující správný směr pohybu robotu.



Obr. 4.4 Princip vyhodnocení polohy robotu na čáře

### 4.3 Korekce dráhy

Robot je předurčen k navigaci sledováním čáry na podlaze. K určení odchylky od požadovaného směru slouží detektor čáry složený z osmi odrazných infračervených snímačů, jehož výstupní hodnotou je celé číslo na intervalu  $\langle -7;7 \rangle$ . Pohonnými jednotkami jsou dva elektromotory, kterými je rovněž určován směr jízdy.

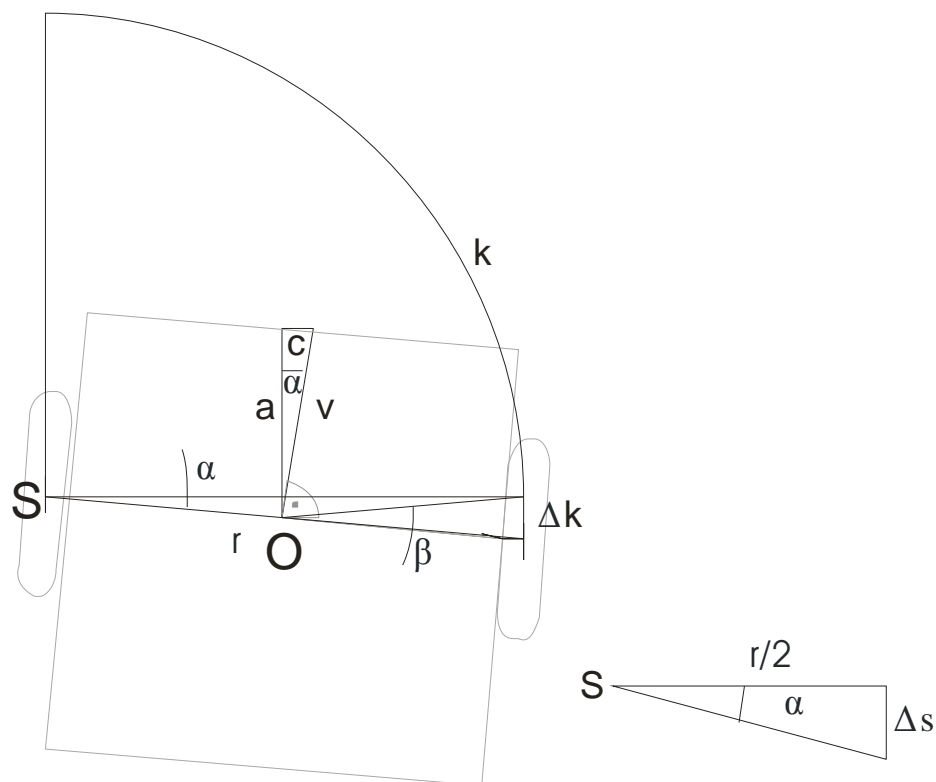
Předpokládejme, že se robot odchýlil od požadované trajektorie o úhel  $\alpha$  (viz. Obr. 4.5), který lze určit pomocí goniometrických funkcí při známé vzdálenosti  $c$ , od středu sledované trajektorie. Robot je nutné nasměrovat tak, aby přesně kopíroval dráhu naznačenou na podlaze.

#### 4.3.1 Řízení robotu přírůstky vzdáleností

Princip korekce směru jízdy je založen na otáčení hnacích kol o přírůstky vzdáleností. Každá korekce je realizována otočením pouze jednoho kola, levého, či pravého, přičemž druhé z nich zůstává v klidu. Tímto pohybem je opisována kružnice  $k$  se středem v bodě  $S$ , v případě otáčení robotu doleva. Robot tedy nemění směr své polohy symetricky opisem kružnice se středem  $O$ , nýbrž nesymetricky, jelikož při symetrickém pohybu je nutné provést otočení obou kol současně a vzájemně v protisměru. Při tomto manévru by robot urazil nulovou vzdálenost, pouze by se otočil na místě a navíc je nevýhodné často střídavě měnit směr otáčení motorů z důvodu rychlého mechanického opotřebování ozubených kol. Dalším problémem, který souvisí



s přesným natočením kol je vůle v převodech ozubených kol. Nikdy nelze docílit nulové vůle v převodech, jelikož se jedná o mechanické části, které se časem opotřebovávají a jednotlivé zuby do sebe přesně nezapadají. Jediným řešením, jak tento jev eliminovat je přizpůsobení ozubených kol zbroušením hran jednotlivých zubů.



Obr. 4.5 Geometrický model robotu

Určení úhlu otočení, respektive posunu kol o požadovanou dráhu je znázorněno následujícími vztahy.

$$\sin \alpha = \frac{c}{v} \quad \Rightarrow \quad \alpha = \sin^{-1} \frac{c}{v}$$

$$\Delta k = \frac{\alpha}{360^\circ} \cdot o = \frac{\alpha}{360^\circ} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r = \frac{\sin^{-1} \frac{c}{v}}{360^\circ} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r$$

$$\Delta n = \frac{\Delta k}{\Delta l} = \frac{\frac{\sin^{-1} \frac{c}{v}}{360^\circ} \cdot \pi \cdot d}{\Delta l} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{\Delta l} \cdot \frac{\sin^{-1} \frac{c}{v}}{360^\circ}$$

$\Delta k...$  dráha posunu pravého/ levého kola [mm]

$\Delta l...$  dráha posunu robotu odpovídající jednomu pulsu čítače [mm]

$\Delta n...$  počet pulsů kvadrurního inkrementálního čítače [-]

Současně s otočením robotu dojde k jeho posunu vpřed o vzdálenost  $\Delta s$ .

$$\Delta s = \tan \alpha \cdot \frac{r}{2}$$

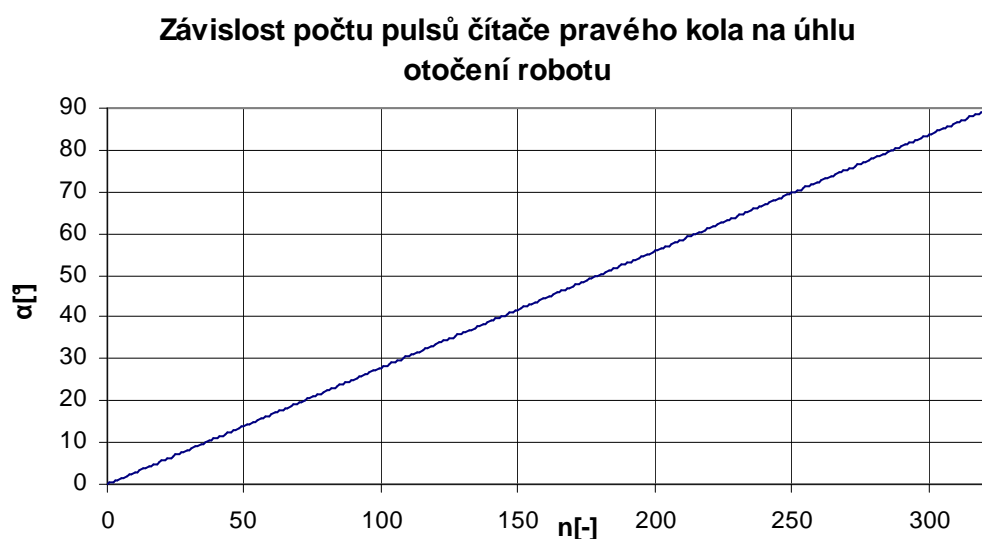
$$\alpha = \frac{360^\circ \cdot \Delta k}{o} = \frac{360^\circ \cdot n \cdot \Delta l}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

$$n_\alpha = \frac{\alpha \cdot o}{\Delta l \cdot 360^\circ} = \frac{\alpha \cdot 2 \cdot \pi \cdot r}{\Delta l \cdot 360^\circ} \approx 3,585 \cdot \alpha$$

$\Delta s...$  dráha posunu robotu [mm]

$n_\alpha...$  počet pulsů čítače, potřebný k otočení robotu o úhel  $\alpha$  [-]

Na obr. 4.6 je znázorněn graf lineární závislosti úhlu otočení robotu vlevo na pohybu robotu pravým kolem kupředu. V případě posunu levého kola vpřed, je situace obdobná s tím rozdílem, že úhel by s rostoucím počtem pulsů klesal od hodnoty  $90^\circ$ . Otočení robotu o úhel  $90^\circ$  odpovídá hodnota 322 pulsů.



Obr. 4.6 Graf závislosti úhlu otočení robotu na počtu pulsů čítače

Otáčení robotu okolo osy v bodě  $S$  (viz. Obr. 4.5), nelze vhodně použít k vybočení robotu ze své dráhy v případě objíždění překážek, či otočení robotu o úhel  $180^\circ$  v úzkých prostorech. Z tohoto důvodu je nutné použít rovněž druhou metodu otáčení, a to okolo středové osy  $O$ . Otáčení v tomto případě probíhá symetricky, otáčejí se obě kola v protisměru. Je podstatné, aby se kola

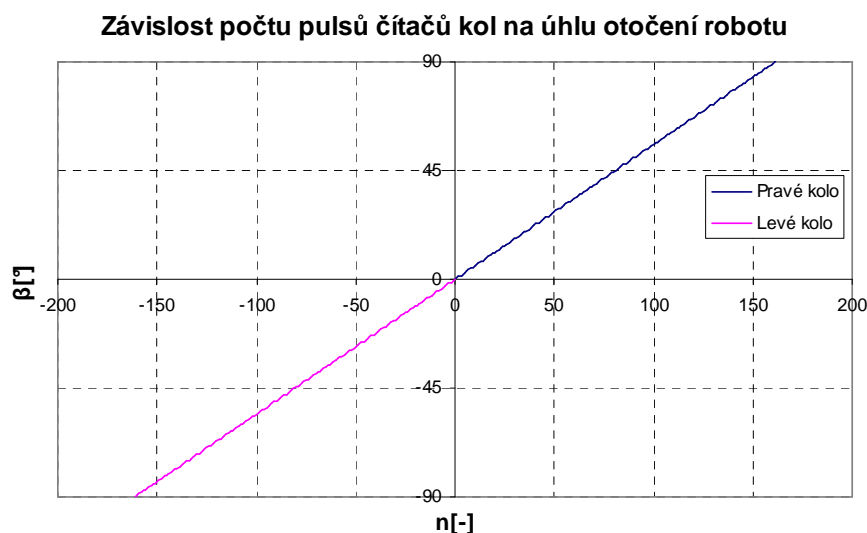
otáčela symetricky stejnou rychlostí, jinak by se robot posunul mimo bod  $O$ . Následujícími vztahy je vyjádřena závislost počtu pulsů inkrementálního čítače na úhlu otočení robotu podle osy  $O$ .

$$\beta = 2 \cdot \alpha$$

$$\beta = \frac{360^\circ \cdot \Delta k}{\frac{o}{2}} = \frac{360^\circ \cdot n \cdot \Delta l}{\pi \cdot r}$$

$$n_\beta = \frac{\beta \cdot \frac{o}{2}}{\Delta l \cdot 360^\circ} = \frac{\beta \cdot \pi \cdot r}{\Delta l \cdot 360^\circ} \approx n = 1,792 \cdot \beta$$

$n_\beta \dots$  počet pulsů čítače, potřebný k otočení robotu o úhel  $\beta$  [-]



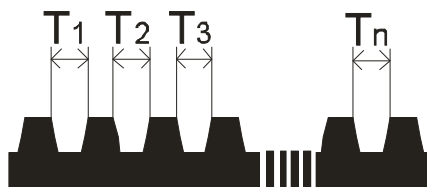
Obr.4.7 Graf závislosti počtu pulsů na úhlu otočení robotu

Předchozí vztahem byla zjištěna lineární závislost počtu pulsů inkrementálního čítače na úhlu otočení. Výsledný vztah  $n = 1,792 \cdot \beta$ , lze snadno aplikovat v PLC při změnách úhlu otočení robotu. Vztah platí pro obě hnací kola s tím rozdílem, že jejich vzájemný smysl otáčení je opačný.

#### 4.3.2 Řízení robotu regulací rychlostí otáčení kol

Metoda řízení, uvedená v předchozí podkapitole je vhodná pro řízení robotu při velmi nízkých hodnotách rychlosti posunu. Vyznačuje se vysokou přesností pohybu robotu, ale nevýhodou je trhaný pohyb. Proto byla testována rovněž druhá varianta řízení robotu, která umožňuje plynulý pohyb, ovšem je náročná na přesnou regulaci rychlostí kol při velmi nízkých otáčkách. Aby bylo možné přesně určit rychlosti otáčení kol, nestačí vyhodnocovat hodnoty

inkrementálních čítačů, jelikož by rozlišení získané hodnoty bylo velmi nízké. K vyhodnocování je tedy využito měření času mezi dvěma zuby během otáčení.



Obr. 4.8 Část ozubeného kola se znázorněním měření period  $T$

Měření rychlosti otáčení kol je realizováno měřením času potřebného k pootočení ozubeného kola o jeden zub. Tuto funkci umožňuje modul X20DC4395 (viz. Tab. 3.5). Modul umožňuje u digitálních I/O aktivovat funkci měření šířky pulsu mezi náběžnými hranami, sestupnými hranami i kombinacemi náběžných a sestupných hran. Před použitím modulu je nutné jej správně konfigurovat. Na Obr. 4.8 je znázorněno nastavení měření času mezi sestupnou a náběžnou hranou kanálu 1. Kanály 1 až 4 mají funkci AB čítačů, jsou k nim připojeny výstupy magnetických rotačních senzorů.

Time measurement functions		
Time measurement channel 01		
Rising edge Channel 01		
Rising edge	on	Disable/enable rising edge function channel 01
Continued/triggered	continued	Select continued/triggered operating mode
Resolution time measurement	62.5 kHz	Resolution
Time stamp of edge	off	Deactivate/activate time stamp of edge
Start edge	channel 01 falling edge	Select starting edge for differential time measurement
Preceding start edge count	0	Select ignored preceding start edges

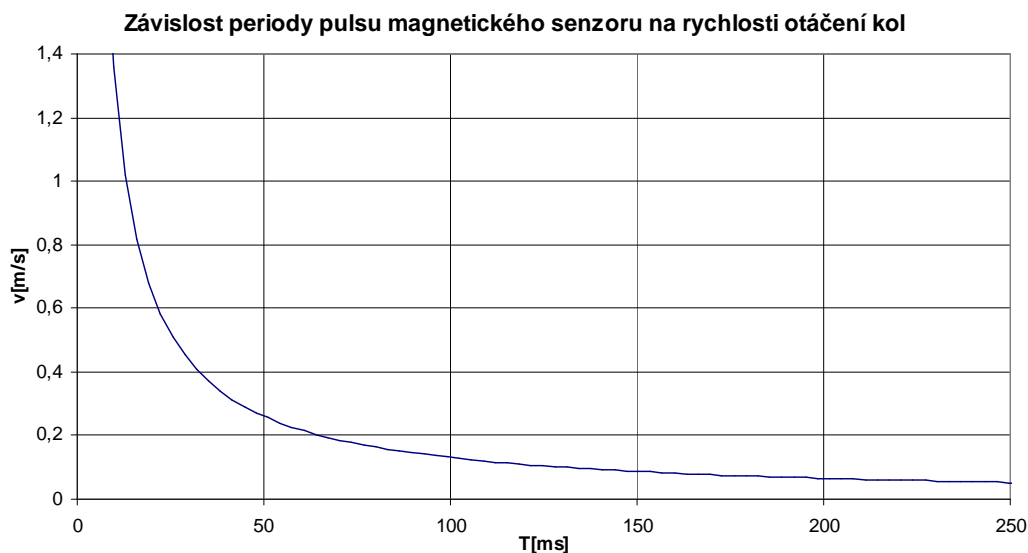
Obr. 4.9 Část konfigurace modulu X20DC4395 v Automation Studio

Z Obr. 4.9 je patrné nastavení náběžné hrany měřeného impulsu a nepřetržitá operace. Změřená hodnota šířky pulsu je ukládána do 16-ti bitového čítače inkrementovaného oscilátorem. Frekvence oscilátoru je zvolena nejnižší nabízená, tedy 62,5kHz, tudíž měření probíhá s rozlišením 16μs. Frekvenci oscilátoru lze zvolit až 8MHz, v tomto případě je ale tato hodnota nevhodná, protože požadujeme měření času řádově desítek až stovek ms.

Princip měření periody je následující. Při detekci sestupné hrany obdélníkového signálu na kanálu 1 je spuštěn čítač, který běží až do detekce náběžné hrany téhož signálu. Následuje zastavení čítače a záznam čítané hodnoty do registru „TimeDiffRisingCH01“. Následně je očekávána další sestupná hrana a vše se opakuje. V případě kanálu 3 je princip totožný. Výsledkem celého procesu během otočení hnacího kola o 360° je 75 měření.

Na obr. 4.10 je zobrazena závislost šířky pulsu výstupu A magnetického rotačního snímače na rychlosti otáčení kol robotu. Z grafu je patrné, že charakteristika má exponenciální průběh.

Rychlost pohybu robotu je udržována v závislosti na směru pohybu okolo 10cm/s, k měření rychlosti je využíván rozsah 100ms až 250ms, který lze pro zjednodušení považovat za téměř lineární.



Obr. 4.10 Graf závislosti šířky impulsu na rychlosti otáčení kol

Výše uvedená metoda je charakteristická vysokým rozlišením měření rychlosti otáčení kol, ovšem informace o této rychlosti je k dispozici v nepravidelných intervalech, závislých na rychlosti otáčení. Během otáčení kola rychlostí 10cm/s je k dispozici informace o rychlosti otáčení 7,66x za vteřinu. Tato frekvence zpětné vazby je pro přesnou regulaci rychlosti otáčení hřídele motoru velmi nízká.

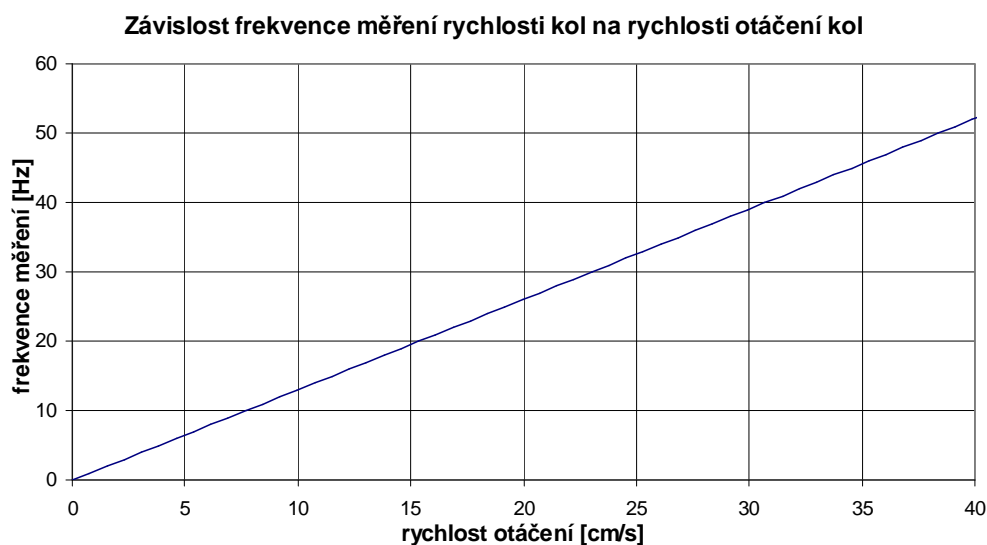
$$f = \frac{v}{o} \cdot n = \frac{10 \text{ cm/s}}{97,87 \text{ cm}} \cdot 75 = 7,66 \text{ Hz}$$

$f...$  frekvence snímání rychlosti otáčení kol [Hz]

$v...$  rychlost robotu [ $\text{m.s}^{-1}$ ]

$o...$  obvod hnacího kola [cm]

$n...$  počet měření na jednu otáčku kola [-]



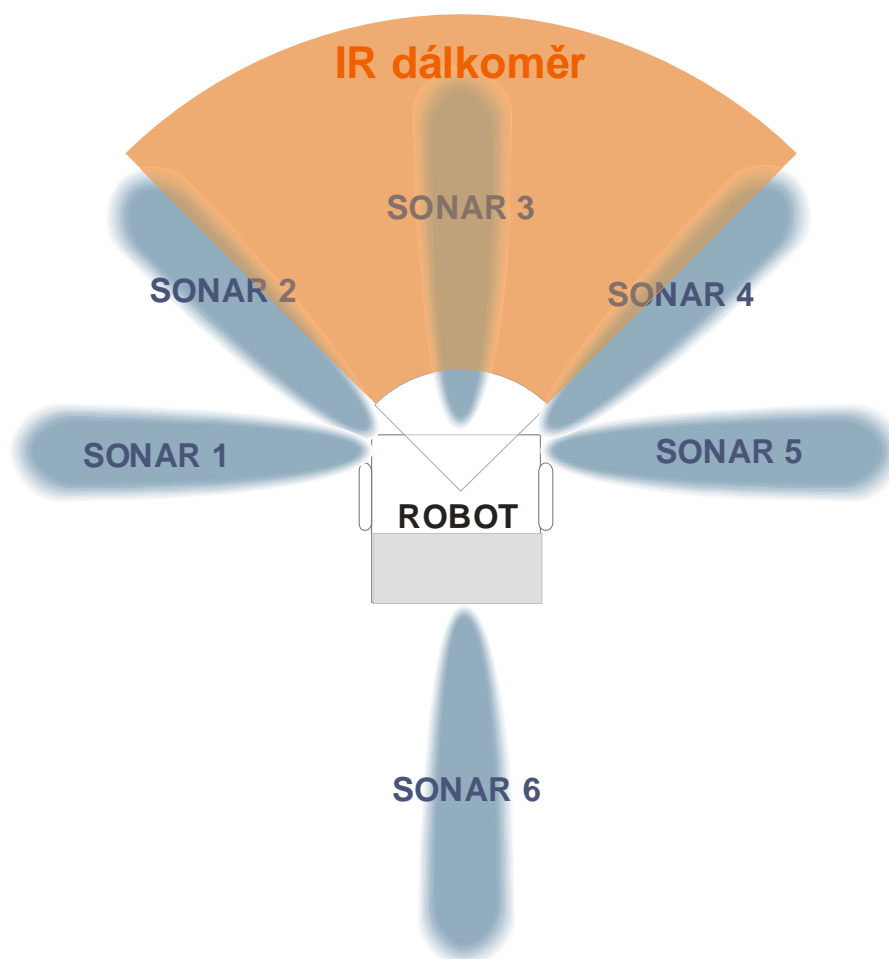
*Obr. 4.11 Graf závislosti frekvence měření rychlosti na rychlosti otáčení kol*

## 4.4 Detekce překážek

Robot je osazen sadou snímačů vzdálenosti, které se vzájemně doplňují. Hlavním cílem při volbě rozmístění bylo zajištění detekce překážek před robotem. Vyzařovací charakteristika sonarů má úzký kuželovitý tvar. Dosah sonarů je omezen na vzdálenost 4m. Přední část robotu obsahuje pouze jeden sonar rovnoběžně se směrem jízdy. Oblasti po stranách sonaru č.3 nejsou zachyceny, proto je tato oblast sledována optickým dálkoměrem, umístěným na servomotoru. Servomotor umožňuje měnit úhel snímání optického dálkoměru v rozsahu  $\langle -45^\circ; 45^\circ \rangle$ . Optický dálkoměr je určen k měření bodové vzdálenosti předmětů v rozsahu 90cm až 5,5m.

V zadní části robotu je umístěn pouze jeden ultrazvukový dálkoměr, pro případ couvání. Sonary 1 a 5 slouží v případě průjezdu robotu úzkou chodbou k udržování stejných vzdáleností od bočních stěn.

Bílé oblasti v okolí robotu nejsou snímači vzdálenosti zaměřeny.



Obr.4.12 Aktivní oblasti snímačů vzdálenosti

## 4.5 Řídicí program

Řízení přepravního systému obstarává programovatelný logický automat X20CP1483. K vývoji řídicí aplikace PLC je použito univerzální vývojové prostředí *Automation Studio 3.0.71* společnosti B&R. Běh aplikace je rozdělen do čtyř úloh, které jsou řazeny do úlohových tříd podle potřebné priority a četnosti spouštění. Úlohy lze dále rozdělit do tří částí:

*Inicializační část* – tato část proběhne pouze před prvním spuštěním cyklické úlohy.

*Cyklická část* – část úlohy, která je spouštěna pravidelně v závislosti na úlohové třídě

*Ukončující část* – část úlohy, která proběhne pouze po odstranění, přemístění úlohy, či ukončení aplikace

### 4.5.1 Úloha „Serial“

Úkolem této části programu je zajištění komunikace PLC po rozhraní RS-232, respektive čtení dat z RFID čtecích zařízení. Aby bylo možné využívat funkce k řízení sériové linky, je nutné do projektu v Automation Studiu načíst knihovnu „*dvframe*“.

Inicializace sériové komunikace je realizována především výběrem a otevřením sériového portu a definicí parametrů komunikace. Do proměnné *StringDevice* je uložen řetězec, označující sériový modul, v našem případě se jedná o přídatný modul X20IF1020, jehož označení je podle hardwarové konfigurace „*SS1.IF1*“. Řetězec *StringDevice* umožňuje zadat množství parametrů komunikace, ale nastavena je pouze rychlost komunikace 19200 baudů, bez kontroly parity, 8 datovými bity a jedním STOP bitem.

```
strcpy(StringDevice, "SS1.IF1");  
strcpy(StringMode, "/BD=19200 /PA=N /DB=8 /SB=1");
```

Následuje otevření sériového portu, respektive rezervace portu funkcí *FRM\_xopen(&FrameXOpenStruct)*. Pokud během otevírání portu došlo k chybě, je hodnota chyby uložen do proměnné *status* ve struktuře *FrameXOpenStruct*. Úspěšné otevření portu je indikováno hodnotou 0 v proměnné *status*.

Cyklická část úlohy *Serial* obstarává čtení dat ze sériového portu funkcí *FRM\_read(&FrameReadStruct)*. Tato procedura je spuštěna pouze tehdy, pokud byl sériová port úspěšně otevřen. Dále je do předem vytvořeného globálního pole *ReadBuffer* zkopírován obsah zásobníku sériového portu. Následně je nutné zásobník uvolnit funkcí *FRM\_rbuf(&FrameReleaseBufferStruct)*.

```
if (StatusRead == 0)                                /* zkontroluje status */  
{  
    memcpy(READ_DATA, ReadBuffer, 20 * sizeof (USINT)); /* zkopíruje data do pole */  
  
    /* inicializuje strukturu pro uvolnění zásobníku */  
    FrameReleaseBufferStruct.enable = 1;  
    FrameReleaseBufferStruct.ident = Ident;  
    FrameReleaseBufferStruct.buffer = (UDINT) ReadBuffer;  
    FrameReleaseBufferStruct.bufIn = ReadBufferLength;  
  
    FRM_rbuf(&FrameReleaseBufferStruct); /* uvolní čtecí zásobník */  
}
```



#### 4.5.2 Úloha „CardReader“

Inicializační funkce uloží do pole struktur *CardData* tři datové byty všech deseti známých karet. Jená se o 12-tý, 17-tý a 18-tý byte každé karty. Toto pole struktur slouží k následné identifikaci načtené karty.

Cyklická část programu porovnává data načtená ze sériového portu s databází známých karet. V případě shody všech tří porovnávaných bytů (proměnné *error\_B12*, *error\_B17* a *error\_B18* jsou nulové) přiřadí RFID kartě číslo od 1 do 10 prostřednictvím globální proměnné *CARD\_NUMBER*. Nula znamená, že nebyla na doposud načtena žádná karta. Rovněž je testováno na základě prvního bytu celé zprávy, která čtečka kartu přečetla. Podle ASCII tabulky je testována hodnota (48)<sub>D</sub>, jíž náleží znak 0 (viz. Tab. 3.12).

```
for(index = 0; index < 10; index++)
{
    if (READ_DATA[12] == Card_data[index].B12)
        error_B12 = 0;
    else
        error_B12 = 1;
    ...
    ...
    if (error_B12 == 0 && error_B17 == 0 && error_B18 == 0)
    {
        CARD_NUMBER = index + 1; /*čísla karet od 1 do 10*/
        error_B12 = 0;
        error_B17 = 0;
        error_B18 = 0;

        if (READ_DATA[1] == 48) /*určení RFID čtečky*/
            CARD_READER = 0;
        else
            CARD_READER = 1;
    }
}
```

#### 4.5.3 Úloha „Sensors“

Úloha „Sensors“ obstarává vyhodnocení vzdáleností ultrazvukových sonarů, infračerveného dálkoměru a tenzometrické váhy. Skládá se pouze z cyklické části.

Měření ultrazvukových senzorů nelze provádět u všech současně, jinak by docházelo k ozvěnám způsobujícím chybné měření. Proto jsou sonary aktivovány postupně v rozsahu 100ms pomocí digitálních výstupů modulu X20DO9322 (viz. Tab. 3.3). V proměnné *sonar* je cyklicky generována hodnota od 1 do 6 v závislosti na aktivním sonaru a pomocí příkazu *switch(sonar)* je naměřená šířka pulsu zaznamenána v proměnné *distance*. Převedení hodnoty na vzdálenost v cm probíhá dělením 11.

```
switch(sonar)
{
    case 1:
        distance1 = distance;
        break;
    ...
    case 6:
        distance6 = distance;
        break;
}
if(sonar != 6)
    sonar++;
else
    sonar = 1;
```

Hmotnost je měřena samostatným DMS modulem X20AI1744, jehož parametry je nutné programově nastavit zápisem hodnoty (48)<sub>D</sub> do proměnné *gravity\_settings*, propojené s konfiguračním registrem měřicího modulu (viz. Tab. 3.9). Získání hmotnosti v gramech je realizováno dělením naměřené hodnoty konstantou (420)<sub>D</sub>.

```
gravity_settings = 48;
gravity_weight = gravity_value/420; /*hmotnost v gramech*/
```

Optický dálkoměr má nelineární charakteristiku (viz. Obr. 3.19), kterou je potřeba linearizovat aproximační funkcí třetího řádu (viz. Obr. 3.20). Před samotnou linearizací je analogová hodnota optického dálkoměru převedena na napětí v mV násobením konstantou (0,3058)<sub>D</sub>, respektive (100/327)<sub>D</sub>.

```
opt_voltage = (opt_value * 100)/327; /*napětí v mV*/
```

```
opt_distance = (-0.0000000448693302223096 * opt_voltage * opt_voltage * opt_voltage)
+ (0.000319160905896767 * opt_voltage * opt_voltage) - (0.797203949444977 * opt_voltage) +
806.762663854670;
```

#### 4.5.4 Úloha „Engines“

Úloha „Engines“ tvoří nejdůležitější část celého programu PLC, jelikož zajišťuje řízení elektromotorů včetně vyhodnocení směru pohybu. Z tohoto důvodu je umístěna v úskokové třídě s nejvyšší prioritou a časem cyklu v trvání 10ms. Úloha se skládá z hlavního programu a ze tří podprogramů:

```
SINT  Line_position (void)
Void   Line_follow (unsigned short int turn_LR)
Void   Engines_speed (unsigned int speed_L_set, unsigned int speed_R_set)
```

Hlavní program obstarává přemísťování robotu na základě identifikace RFID karet, určuje směr odbočení na rozcestích a dohlíží na doručení zboží na požadované stanoviště. Na základě těchto parametrů spouští výše uvedené funkce, které zajišťují chod motorů.

Funkce *Line\_position()* vyhodnocuje logické hodnoty z odrazných snímačů a na základě algoritmu, popsaném v podkapitole 4.2. Načtené hodnoty jsou na začátku funkce negovány, z důvodu přehlednějšího zpracování. Detekovaná čára je tedy v případě tmavé linie a světlého podkladu reprezentována úrovní log.1. Funkce vrací celočíselnou hodnotu *change\_dir* datového typu *short integer* v rozsahu  $<-7 ; 7>$ , na základě které provádí funkce *Line\_follow(turn\_LR)* příslušnou změnu směru pohybu robotu.

Funkce *Line\_follow(turn\_LR)* přijímá hodnotu funkce *Line\_position()* a ukládá ji do proměnné *line\_position*. Základní úlohou je rozhodování, zda se sledovaná linie nachází v levé či pravé části optického odrazného snímače. V případě, že je robot nasměrován správně, je nastavena stejná rychlost pro obě kola. Poslední variantou je ztráta sledované trajektorie, kdy je robot uveden do klidového stavu. Na základě této informace je provedena korekce dráhy a spuštěna funkce, která obstarává pohyb kol.

```
if(line_position > 0 && line_position < 8)          /* zahni vpravo*/
{...}
else if(line_position < 0 && line_position > -8)     /* zahni vlevo*/
{...}
else if(line_position == 0)                          /* jed' rovně*/
{...}
else                                                 /* STOP*/
{...}
```

Funkce *Line\_follow(turn\_LR)* rovněž zajišťuje změnu směru robotu na rozcestích. Rozcestí je reprezentováno rozšířením sledované linie, které se projeví tím, že dojde k aktivaci minimálně 4 infračervených odrazných senzorů. Proměnnou *turn\_LR* poskytuje hlavní funkce

úlohy *Engines*. Po detekci rozcestí je robotu dočasně zvýšena rychlost pravého či levého kola tak, aby oblast pokryté odrazného senzoru zaznamenávala pouze jednu větev sledované linie.

```
if(suma_LED > 3)
{
    switch(turn_LR)
    {
        Case 0:      /* neměň směr */
            ...
        Case 1:      /* odboč vlevo */
            ...
        Case 2:      /* odboč vpravo */
            ...
    }
}
```

Funkce *Engines\_speed(speed\_L\_set, speed\_R\_set)* udržuje požadovanou rychlost každého kola na základě výsledku funkce *Line\_follow(turn\_LR)*. Rychlost je udržována na požadované hodnotě v závislosti na zpětné vazbě tvořené měřením šířky pulsu mezi zuby ozubeného kola (viz. Obr. 4.8). Akční veličina řízení elektromotorů, tvořená PWM signálem, je z bezpečnostních důvodů limitována hodnotou 300, tedy omezena na maximální šířku pulsu 30%.

[5],[6],[7],[8],[9],[10],[11]

## 5 Vlastnosti přepravního systému

Poslední kapitola zahrnuje možnosti využití komponent robotu při zdokonalování řídicích algoritmů. Zabývá se detekcí a určením polohy případných překážek. Charakterizuje komunikaci robotu s nadřazeným systémem, realizovanou pomocí bezdrátové sítě, která je důležitou součástí celé aplikace, jelikož umožňuje monitorovat stav přepravního systému. Monitorování je zprostředkováno grafickou vizualizací v systému Promotic.

### 5.1 Lokalizace překážek

Díky 6 použitým ultrazvukovým senzorům je robot schopen monitorovat pevné překážky v okruhu přibližně 4m. Přední část robotu je navíc vybavena otočným infračerveným dálkoměrem, který umožní určit nejen vzdálenost případné překážky, ale především v kombinaci se servomotorem měnit svůj úhel otočení a sledovat skokovou změnu vzdálenosti. Tato metoda umožní určit polohu překážky vzhledem k robotu, a také její rozměry. Tyto informace jsou velmi důležité pro případný objezd překážky. Celý postup lze provést následujícími kroky.

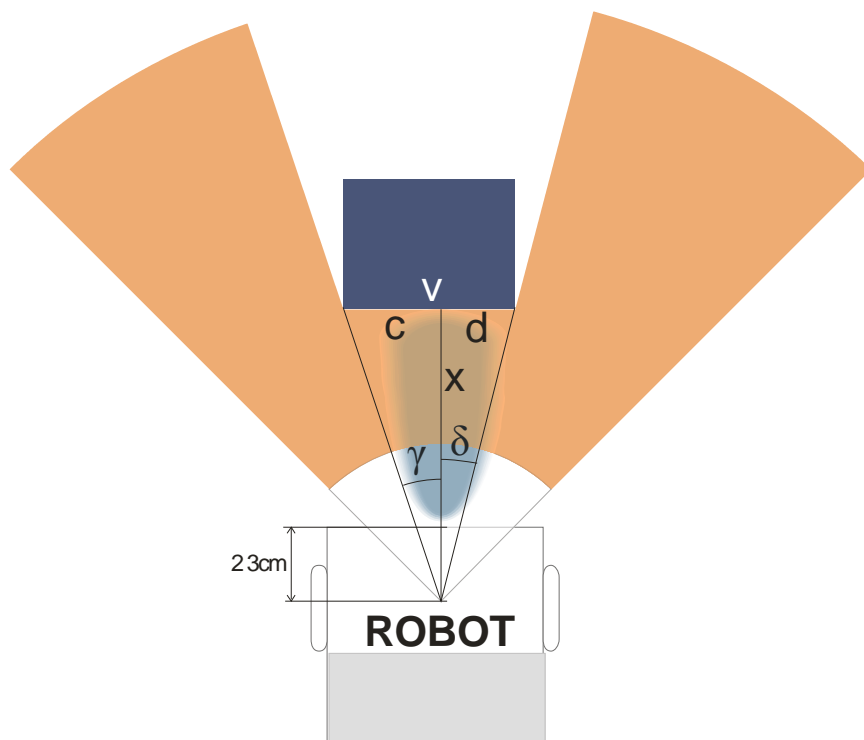
Předpokládejme, že se překážka nachází přímo před robotem. Nejprve je zachycena ultrazvukovým dálkoměrem, je ověřeno, zda je překážka statická, nebo se jedná např. o procházející osobu. V případě, že je překážka statická, je nutné se jí během pohybu vyhnout. Robot natočí optický dálkoměr do levé krajní polohy, zaznamená naměřenou vzdálenost a začne postupně dálkoměrem otáčet do protilehlé krajní polohy. Během tohoto pohybu průběžně sleduje bodovou vzdálenost a porovnává ji se vzdáleností naměřenou ultrazvukovým dálkoměrem. V okamžiku, kdy se optický dálkoměr zachytí objekt ve vzdálenosti shodující se se vzdáleností naměřenou sonarem, s tolerancí přibližně 20%, zaznamená úhel natočení. Toleranci je nutné zohlednit ze dvou důvodů. Za prvé neměří dálkoměry absolutně shodně vlivem nelinearity, za druhé k měření vzdálenosti nedochází vždy v obou případech v kolmém směru k překážce, která má rovnou přední hranu.

Následuje otáčení optického dálkoměru až po detekci druhé hrany měřené překážky. Poté je rovněž zaznamenán úhel otočení. Nakonec je třeba vyhodnotit rozměr překážky, a její pozici vzhledem ke střední ose směru jízdy robotu, aby bylo možné provést objezd překážky po nejkratší trase.

$$c = \operatorname{tg}|\gamma| \cdot (x + 230\text{mm})$$

$$d = \operatorname{tg}\delta \cdot (x + 230\text{mm})$$

$$v = c + d$$



*Obr. 5.1 Znáznornění principu vyhodnocení parametrů detekované překážky*

## 5.2 Bezdrátová komunikace

Programovatelný automat disponuje rozhraním ETHERNET, je tedy připojen formou místní sítě k bezdrátovému přístupovému bodu D-Link DI-524. Komunikace s PC s integrovanou bezdrátovou kartou, probíhá po bezdrátové síti Wi-Fi.

Aby bylo možné komunikaci zprostředkovat, musí být stanoveny IP adresy obou zařízení. Nejprve je nutné přiřadit IP adresu programovatelnému logickému automatu a nastavit rozsah adres v AP. Prvním krokem je konfigurace PLC ve vývojovém prostředí Automation Studio. Vzhledem k tomu, že nebylo možné provést počáteční komunikaci s PLC prostřednictvím sériové linky RS-232, z důvodu absence tohoto rozhraní v PC, bylo nutné zkopírovat vytvořenou konfiguraci na paměťovou kartu typu Compact Flash, určenou pro PLC. Konfigurace byla nastavena na komunikaci PLC s PC po místní síti Ethernet a přiřazena IP adresa 192.168.10.10, včetně masky podsítě 255.255.255.0. Následně proběhlo nastavení IP adresy bezdrátové síťové karty v PC, 192.168.10.11 se stejnou maskou podsítě. Spuštění komunikace proběhlo vyhledáním a následným připojením bezdrátového přístupového bodu D-Link, u něhož byl vhodně nastaven rozsah IP adres.



*Obr. 5.2 Schéma komunikace PLC s PC*

### 5.3 Identifikace nákladu

Převážní systém je vybaven zařízením pro identifikaci přepravovaného nákladu a projížděné trasy. Součástí identifikace je tenzometrická váha, která umožňuje zvažení nákladu s rozlišením 1g, do hmotnosti max. 15kg. Po vložení nákladu na váhu, umístěnou v zadní části robotu, je načtena jeho RFID značka, na základě které robot zboží porovná s databází, provede vážení, a zjistí, zda se oba parametry shodují. Pokud vše proběhne v pořádku, identifikace nákladu rozhodne o cílovém stanovišti, na které bude náklad převezen.

### 5.4 Přeprava nákladu

Navigace robotu je realizována sledováním kontrastní linie na podlaze. Vyhodnocení polohy linie zajišťuje detektor čáry, tvořený sadou osmi infračervených odrazných senzorů. Jakmile robot detekuje vodící linii a načte startovní RFID značku na podlaze, začne se pohybovat po dané trajektorii, dokud nenarazí na rozcestí. Rozcestí je definováno rozšiřující se vodící linií, indikováno aktivací minimálně čtyř infračervených odrazných senzorů. Robot upraví směr jízdy v závislosti na přepravovaném nákladu a pohybuje se po příslušné vodící větvi, doku nenarazí na cílovou značku, reprezentovanou RFID čipem. Provede otočení okol své osy o 180° a zastaví se, dokud není náklad odebrán obsluhou. Poté se vrátí na startovní pozici. Tento způsob přepravy materiálu je pouze demonstrační, zpravidla bývá soustava drah složitější.

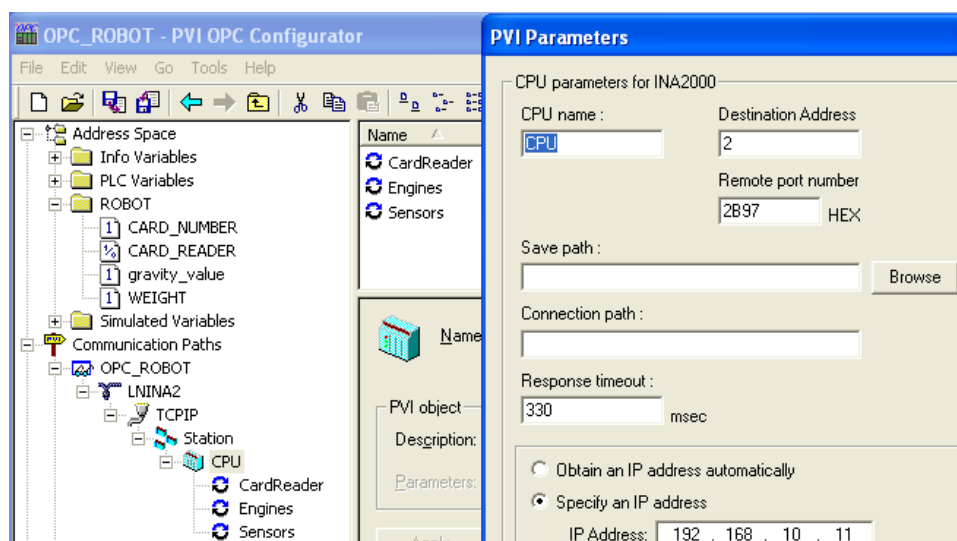


Obr. 5.3 Struktura zjednodušené tranzitní dráhy

## 5.5 Vizualizace procesu

K testování funkčnosti a vlastností systému výrazně přispěla vizualizace na PC. Z tohoto důvodu byla vytvořena vizualizace v prostředí Promotic, umožňující sledovat naměřené hodnoty snímačů fyzikálních veličin a periférií robota.

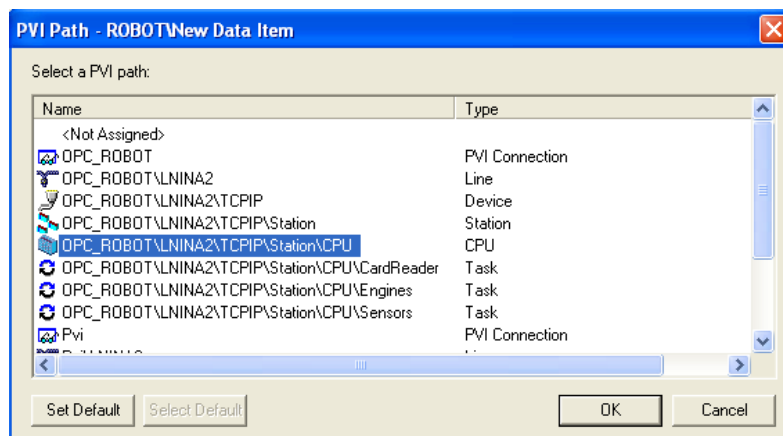
K poskytnutí proměnných z PLC pro vizualizaci slouží OPC server. Jedná se o aplikaci, běžící na pozadí PC, která cyklicky načítá proměnné z PLC a umožňuje je dále zpracovávat OPC klientem, kterým je Promotic. OPC Server je nejprve nutné nastavit pomocí PVI OPC konfiguratoru. Nastavení komunikačních cest k proměnným probíhá výběrem komunikačního protokolu INA2000, typu komunikace TCPIP, IP adresy připojeného PLC apod.



Obr. 5.4 Konfigurace OPC Serveru

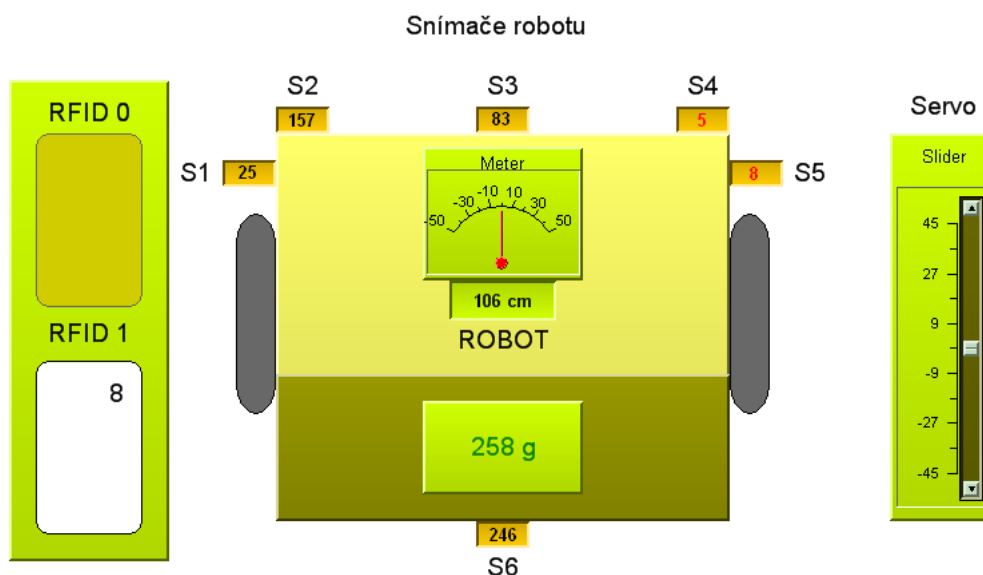
Následně načteme proměnné, které chceme poskytovat OPC klientům, v záložce „Address Space“. Proměnné lze načíst automaticky na základě zadaného umístění v PLC, připojeného online, nebo ručně. Ruční metoda spočívá ve výběru cesty, respektive úlohy, ve které se proměnná nachází, v případě lokální proměnné. Globální proměnné jsou k dispozici na cestě typu CPU.





Obr. 5.5 Struktura cest OPC Serveru k proměnným PLC

Levá část vizualizace zobrazuje RFID čtecí zařízení. Jakmile je načtena RFID karta, je zobrazeno její číslo na základě čtečky, která jej přečetla, v horním, či dolním okně. Příslušná karta je poté podbarvena bílou barvou. Sonary S1 – S6 určují vzdálenost detekované překážky v centimetrech. Barva písma je zelená, pokud je vzdálenost překážky větší, než 10cm. Vzdálenost od infračerveného dálkoměru je zobrazena v textovém poli uprostřed konstrukce robotu. Nad tímto textovým polem je umístěn měřicí přístroj, označující úhel otočení serva, na kterém je uchycen infračervený dálkoměr. Úhel otočení serva lze měnit manuálně pomocí posuvného v pravé části vizualizace. Posledním informačním prvkem je informace o hmotnosti nákladu, reprezentovaná v jednotkách g.



Obr. 5.5 Vizualizace robotu v systému Promotic

[6],[12]

## 6 Závěr

Výsledkem této diplomové práce je realizace laboratorního automatického přepravního systému. Návrhu tohoto systému předcházela analýza metod navigace a komunikace systému s nadřazeným systémem. Z hlediska technických možností a ekonomické stránky byla pro navigaci v uzavřeném prostoru zvolena metoda sledování kontrastní linky na podlaze. Od této metody se odvíjí způsob komunikace, která je zajištěna formou bezdrátové komunikační sítě WiFi, zajišťující rozsáhlé možnosti monitorování a řízení procesu přepravy nákladu.

Konstrukce robotu je tvořena hliníkovými profily, plášť robotu včetně kabiny je tvořen plastovými díly. Sklopná kabina usnadňuje přístup k periferiím robotu a pojistkovému panelu. Geometrie podvozku se skládá ze dvou hnacích kol a jednoho opěrného kola v zadní části robotu, čímž je umožněno snadné manévrování. Řízení robotu obstarává programovatelný logický automat řady X20, společnosti B&R. Jedná se o modulární PLC, ke kterému byly vhodně vybrány přídatné moduly s ohledem na maximální využití jejich funkcí. Celý systém je napájen jediným olověným akumulátorem o jmenovitém napětí 12V a kapacitou 18Ah. Toto řešení znamená potřebu převodu napětíových úrovní napájení PLC a periferií dvěma napětíovými měniči. Robot je poháněn dvěma na sobě nezávislými výkonnými elektromotorovými jednotkami, řízenými prostřednictvím výkonových budičů, PWM signály a signály pro určení směru jízdy. Zpětná vazba otáčení hnacích kol je řešena dvěma páry senzorů magnetického pole KMI15 s proudovým výstupem. Sensory jsou upevněny v těsné blízkosti ozubených kol tak, aby jejich výstupy byly obdélníkové signály vzájemně fázově posunuté o 90°. První metodou určení rychlosti otáčení kol je sledování hodnot inkrementálních čítačů, druhou je měření času mezi dvěma zuby ozubeného kola během otáčení hnacích kol. Ideálním řešením je kombinace obou metod, protože rozlišení kvadrurního čítače je pouze 300 pulsů na otáčku kola.

Z finančních důvodů nebyly v robotu použity průmyslové snímače, proto byla zajištěna kompatibilita s PLC, návrhem a následnou konstrukcí převodníků napětíových úrovní. V případě serva byl zhotoven převodník analogového signálu (proudového, i napětíového) na šířku pulsu, použitím jednočipového mikrokontroléru.

Identifikace nákladu a značek na podlaze je zajištěna párem RFID čtecích zařízení, komunikující s PLC prostřednictvím sériového rozhraní RS-232. Určení hmotnosti nákladu obstarává tenzometrická váha s nosností 18kg, v zadní části robotu. Bezpečnost provozu z hlediska detekce překážek před robotem, zajišťuje sada šesti vhodně rozmístěných ultrazvukových dálkoměrů. Sonary po bočních stranách konstrukce umožňují průjezd robotu úzkou chodbou, tři sonary v přední části robotu monitorují případné překážky při pohybu vpřed. Couvání je zabezpečeno posledním sonarem v zadní části robotu. Vzhledem k tomu, že sonary mají relativně úzkou charakteristiku zaměřované oblasti, je sledovaná oblast před robotem posílena o infračervený dálkoměr, měřící bodovou vzdálenost. V kombinaci s uchycením tohoto dálkoměru na otočnou osu serva je zajištěno dokonalé pokrytí přední části robotu v úhlu  $\langle -45^\circ; 45^\circ \rangle$  do vzdálenosti 5m. Kombinace použití všech dálkoměrů umožňuje robotu nejen určit její vzdálenost, ale také rozměr v horizontální ose a referenční polohu vzhledem k robotu. Tyto informace plně postačují robotu k tomu, aby dokázal provést objezd případné překážky i v její těsné blízkosti.

Charakteristika závislosti vzdálenosti objektu od infračerveného dálkoměru na výstupním napětíovém signálu je nelineární. Tento problém byl vyřešen linearizací charakteristiky v Matlabu aproximací 3. řádu. Praktické ověření funkce periferií robotu bylo provedeno vytvořením vizualizace v prostředí Promotic.

Robot disponuje periferiemi, které umožňují velmi široké možnosti jeho zdokonalování v oblasti řízení a navigace. Přesto, že byl robot primárně navržen pro využití v uzavřených prostorech, nabízí možnost vybavení satelitní navigací a elektronickým kompasem pro provoz ve venkovním prostředí. Pro tento případ disponuje PLC volným sériovým portem RS-232. Bezdrátová komunikace prostřednictvím WiFi rozhraní, realizovaného bezdrátovým přístupovým bodem umístěným pod kabinou robotu, umožňuje robot vybavit kamerou s rozhraním Ethernet, data z kamery bezdrátově přenášet do PC, provést analýzu obrazu a na základě této analýzy odeslat výsledky do PLC prostřednictvím OPC Serveru. Robot kombinuje mechanické prvky s výkonovými prvky a elektronikou v jednom celku. Díky těmto vlastnostem lze zkonstruovaný robot považovat za velmi univerzální nástroj nejen pro výuku odborných předmětů v laboratořích.

## 7 Použitá literatura

- [1] Koziorek, J.; Chromčák, L. Logické systémy řízení. Učební text, příklady pro cvičení. VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1490-2.
- [2] Novák, Petr. Mobilní roboty, 1. díl, Praha : BEN – Technická literatura, 2005, ISBN: 80-7300-141-1
- [3] E&K Automation. Automaticky řízený vozík [online]. c2008, [cit. 2008-12-1]. Dostupné z : < <http://www.ek-automation.com/cz/produkty/automaticky-rizeny-vozik.html> >
- [4] Logistika. Automatizace přepravních a manipulačních procesů. [online]. c2008, poslední revize 22. 7. 2008 [cit. 2008-11-20]. Dostupné z : < <http://logistika.ihned.cz/c1-26045590-automatizace-prepravnich-a-manipulacnich-procesu> >
- [5] Automation Studio Basis, TM210, Bernecker & Rainer Industrie – Elektronik G.m.b.H. - firemní dokumentace, ©2007
- [6] Automation Studio online communication, TM211, Bernecker & Rainer Industrie – Elektronik G.m.b.H. - firemní dokumentace, ©2007
- [7] Automation Runtime, TM213, Bernecker & Rainer Industrie – Elektronik G.m.b.H. - firemní dokumentace, ©2007
- [8] Memory management and data storage, TM250, Bernecker & Rainer Industrie – Elektronik G.m.b.H. - firemní dokumentace, ©2007
- [9] Automation Studio diagnostics, TM223, Bernecker & Rainer Industrie – Elektronik G.m.b.H. - firemní dokumentace, ©2007
- [10] Automation Studio libraries I, TM260, Bernecker & Rainer Industrie – Elektronik G.m.b.H. - firemní dokumentace, ©2007
- [11] ANSI C, TM248, Bernecker & Rainer Industrie – Elektronik G.m.b.H. - firemní dokumentace, ©2007
- [12] The basics of visualization, TM600, Bernecker & Rainer Industrie – Elektronik G.m.b.H. - firemní dokumentace, ©2007

## **8 Seznam příloh**

- I. Schéma elektroinstalace robotu
- II. Fotografie přepravního systému
- III. Obsah CD
  - schémata zapojení
  - řídicí program v Automation Studio 3.0.71
  - konfigurace OPC Serveru
  - vizualizace Promotic
  - program mikrokontroléru PIC12F675 (převodník analog. signálu na šířku pulsu)
  - technická dokumentace
  - katalogové listy
  - fotogalerie